



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND

University of Eastern Finland

Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta

Faculty of Science and Forestry

**VALTAKUNNALLISET LASERKEILAUSPOHJAISET
PUUSTON PITUUS- JA TILAVUUSMALLIT**

Eetu Kotivuori

METSÄTIETEEN PRO GRADU -TUTKIELMA
ERIKOISTUMISALA METSÄNARVIOINTI JA METSÄSUUNNITTELU

JOENSUU 2015

Kotivuori, Eetu 2015. Valtakunnalliset laserkeilauspohjaiset puuston pituus- ja tilavuusmallit. Itä-Suomen yliopisto, luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta, metsätieteiden osasto. Metsätieteen pro gradu -tutkielma, erikoistumisala metsänarviointi ja metsäsuunnittelu. 44 s.

TIIVISTELMÄ

Työn tavoitteena oli selvittää, kuinka hyviä puuston kokonaistilavuus- ja valtapituusennusteita voitaisiin saavuttaa laserkeilauspohjaisilla malleilla käyttäen aluekohtaisten mallien sijasta koko Suomen kattavaa yleistä mallia. Tutkimusaineistona käytettiin yhdeksää Suomen Met-säkeskuksen inventointihanketta eri puolilta Suomea. Jokaiselta inventointialueelta olivat käytössä maastossa mitatut koealojen lukupuutiedot ja laserkeilatut korkeuspisteet kyseisiltä koealoilta. Yleiset ja aluekohtaiset mallit muodostettiin OLS-estimoinnilla ja niiden muodot valittiin pienimmän RMSE:n perusteella. Yleisten ja aluekohtaisten mallien validointi suoritettiin ”jätä-yksi-pois” -ristiinvalidoinnilla. Mallien ennustetarkkuuksia vertailtiin suhteellisen RMSE:n ja harhan avulla. Lopuksi testattiin, kuinka hyvin yleisellä mallilla tuotetut aluekohtaiset ennusteet paransivat uudelleen sovitettaessa yleiset mallit pienellä, inventointialuetta hyvin edustavalla, koealajoukolla.

Työn tulosten mukaan yleisen tilavuusmallin ja aluekohtaisten tilavuusmallien ristiinvalidoitujen RMSE-arvojen erot ja yleisten tilavuusmallien harhat olivat korkeimmillaan Suomen pohjoisosissa. Kolarin ja Ranuan inventointialueilla RMSE-arvojen erot olivat jopa 9,3 ja 9,7 prosenttiyksikköä ja yleisen tilavuusmallin harhat 16,8 ja 18,2 prosenttia. Muiden inventointialueiden RMSE-arvojen erot vaihtelivat 0,6 ja 5,0 prosenttiyksikön ja yleisen tilavuusmallin harhat -13,2 ja 10,8 prosentin välillä. Lähimpänä nollaa harha oli Turun inventointialueella, jossa se oli vain -2,0 prosenttia. Valtapituuden kohdalla RMSE-arvojen erot olivat Turun alueella lukuun ottamatta hyvin pieniä. Tornion inventointialueella RMSE-arvojen ero oli 4,5 prosenttiyksikköä, muualla Suomessa erojen vaihdellessa vain 0,0 – 0,7 prosenttiyksikön välillä. Yleisen valtapituusmallin harha oli Tornion inventointialueella -9,1 prosenttia, muilla inventointialueilla harhan vaihdellessa -1,9 ja 2,8 prosentin välillä.

Yleiset puuston laserkeilauspohjaiset kokonaistilavuusmallit luovat aluekohtaisiin malleihin verrattuna melko hyviä tuloksia, ottaen huomioon metsien erilaisen rakenteen Suomen pohjois- ja eteläosien välillä. Yleistä tilavuusmallia suoraan hyödynnettäessä on varauduttava mahdollisesti suuriinkin harhoihin varsinkin Suomen pohjoisosissa. Yleinen valtapituusmalli puolestaan toimisi tämän työn tulosten perusteella koko maassa erittäin hyvällä tarkkuudella. Työn tulokset indikoivat, että käytetyllä keilainyksilöllä ja -mallilla voisi olla vaikutusta yleisen mallin ennustetarkkuuksiin. Yleisten mallien ennustetarkkuuksia voitaisiin jatkossa pyrkiä parantamaan esimerkiksi keilaintyypeittäin luotavien yleisten mallien avulla. Yleisten mallien uudelleensovitus paransi mallien ennustetarkkuuksia erityisesti yleisen tilavuusmallin kohdalla. Yleisen valtapituusmallin tapauksessa uudelleensovituksesta ei ollut merkittävää hyötyä.

Avainsanat: kaukokartoitus, laserkeilaus, koeala, yleinen malli, aluekohtainen malli, tilavuus, valtapituus, OLS, RMSE, harha

Kotivuori, Eetu 2015. Nationwide airborne laser scanning based tree height and volume models. University of Eastern Finland, Faculty of Science and Forestry, School of Forest Sciences. Master's thesis in Forest Science, specialization Forest Mensuration and Forest Planning, 44 p.

ABSTRACT

The aim was to study how well total volume and dominant height can be predicted using nationwide models instead of regional models. The research material consisted of nine Finnish Forestry Centre inventory projects in various parts of the Finland. Field sample plots and airborne laser scanning data (ALS) was used from each inventory area. National and regional models were fitted using OLS-estimation and model forms were chosen by smallest RMSE. Validation of national and regional models was done by "leave-one-out" -cross-validation. Accuracy of different models was compared using RMSE and bias. Finally, it was tested how much predictions improve when national models are refitted with a small number of regional sample plots.

According to the results, differences between national and regional RMSE-values of volume models were highest in northern part of the Finland. In Kolari and Ranua inventory areas differences were 9.3 and 9.7 percentage points, respectively. Corresponding bias values were 16.8 and 18.2 percent. In other inventory areas RMSE-values varied between 0.6 and 5.0 percentages and bias between -13.2 and 10.8 percent. Closest to zero the bias was in inventory area of Turku, where it was only -2.0 percent. In the case of dominant tree height, differences of RMSE-values were very small with the exception of Tornio. RMSE differences were 4.5 in Tornio and 0.0 – 0.7 percentage points in other parts of the Finland. Bias of the dominant tree height was -9.1 percent in Tornio and -1.9 to 2.8 percent in rest of the Finland.

Although the forest structures differ in different parts of Finland, it is still possible to obtain relatively good predictions using national volume models. A risk to bias has to be accepted if the national volume model is used, especially in northern part of the Finland. In turn, the national dominant tree high model performs well in the whole country. Results of this work indicate that the used laser scanning unit effects to the prediction accuracy. Predictions would be better if models are created separately for different laser scanning devices. Re-fitting improved especially national volume models. In case of dominant tree height model, re-fitting didn't bring out any significant benefits.

Key words: remote sensing, airborne laser scanning, lidar, sample plot, national model, regional specific model, volume, dominant height, OLS, RMSE, bias

ALKUSANAT

Ensimmäisenä haluaisin kiittää Petteri Packaleniä ja Lauri Korhosta työn ideoinnista ja hyvästä ohjauksesta. Haluaisin kiittää myös Suomen Metsäkeskusta, Blom Karttaa, TerraTeciä ja Maanmittauslaitoista yhteistyöstä työn aikana. Lopuksi haluaisin kiittää Ilona Mustosta työn oikoluvusta.

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	6
1.1 Kaukokartoitusperusteinen kuviotason inventointi Suomessa	6
1.1.1 Inventointitiedon tuottaminen	6
1.1.2 Kuviokohtainen ennustaminen	8
1.2 Mallinnustekniikoista	9
1.3 Aikaisemmin mitattujen maastokoealojen hyödyntäminen uusissa hankkeissa.....	9
1.4 Tutkimuksen tavoitteet	10
2. AINEISTO.....	12
2.1 Maastoaineisto	12
2.1.1 Suomen Metsäkeskuksen virallinen maastotyöohje koealamittaukseen	13
2.1.2 VMI-SMKI -maastotyöohje koealamittaukseen.....	14
2.1.3 TerraTecin maastotyöohje koealamittaukseen	15
2.1.4 Blom Kartan maastotyöohje koealamittaukseen	16
2.2 Laserkeilausaineisto.....	16
2.3 Inventointialuekohtaisten aineistojen käsittely ja yhdistäminen	17
3. MENETELMÄT.....	19
3.1 Puustotunnusten laskenta.....	19
3.2 Lasertunnusten laskenta.....	20
3.3 Mallinnus, mallien valinta ja ristiinvalidointi	21
3.4 Yleisten mallien uudelleensovitus	23
4. TULOKSET	25
4.1 Yleiset ja aluekohtaiset mallit.....	25
4.2 Mallien ristiinvalidointi kaikilla aineiston koealoilla.....	28
4.3 Yleisten mallien uudelleensovitus pienellä koealajoukolla.....	32
5. TULOSTEN TARKASTELU	34
5.1 Mallien ennustetarkkuudet mallinnusaineistossa ja mallien selittäjät.....	34
5.2 Yleisten ja aluekohtaisten mallien väliset erot ”jätä-yksi-pois” -ristiinvalidoinnissa	35
5.3 Laserkeilaimen vaikutus RMSE- ja harha-arvoihin	37
5.4 Uudelleensovitettujen yleisten mallien ennustetarkkuudet	38
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	42
LÄHTEET	43

1. JOHDANTO

1.1 Kaukokartoitusperusteinen kuviotason inventointi Suomessa

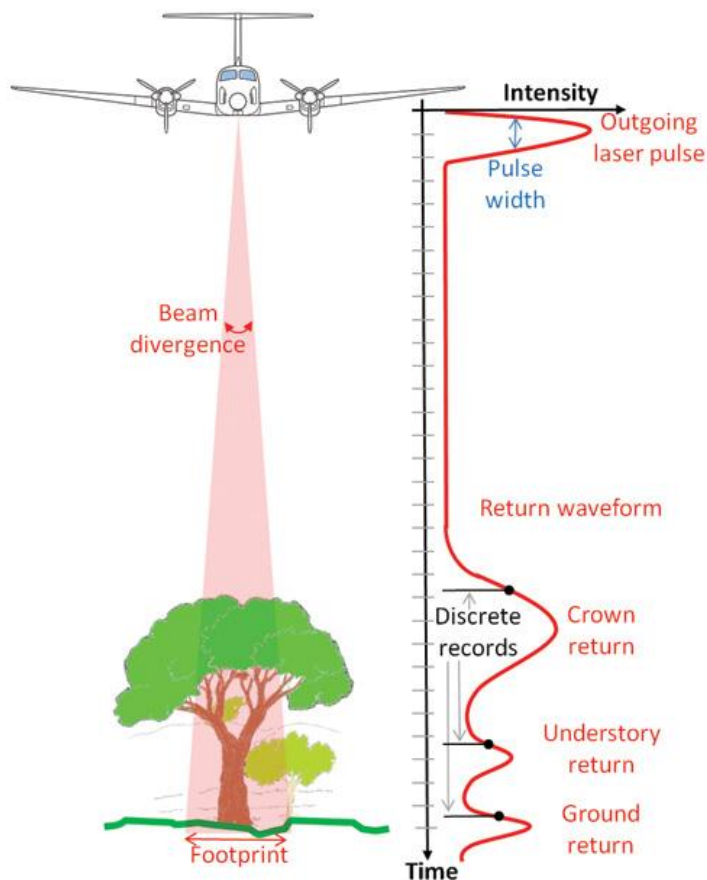
Kaukokartoitus on tiedon keräämistä sähkömagneettisen säteilyn avulla ilman fyysistä kontaktia mitattavaan kohteeseen. Kaukokartoitusperusteinen inventointi voidaan ajatella prosessina, jossa tiedot hankitaan, siirretään, tallennetaan, esikäsitellään, tulkitaan ja esitetään niistä tarvittavat tulokset. Kaukokartoitusta käytettäessä on mahdollista saada tietoa laajoiltakin alueilta yhdellä kertaa ja se on mittausmenetelmänä hyvin objektiivinen. Kaukokartoituksessa käytetään useimmiten maastotietoja tulkinnan apuna (Kangas ym. 2011). Kuviotason metsävaratiedon hankinta perustuu Suomessa laajalti tänä päivänä kaukokartoitusperusteiseen inventointiin, jossa hyödynnetään laserkeilausta (ALS = Airborne Laser Scanning) kaukokartoitusmenetelmänä. Laserkeilausperusteinen kuviotason inventointi perustuu laserkeilausaineiston, ilmakuvien ja maastokoealojen yhteiskäyttöön.

1.1.1 Inventointitiedon tuottaminen

Laserkeilaus suoritetaan yleensä käyttäen lentokonetta, johon asennetun lasertykin lähettämien laserpulssien ja kaikuja avulla voidaan määrittää etäisyys kohteen ja keilaimen välillä. Laserin asento ja sijainti määritetään GPS:n ja inertiajärjestelmän avulla (Kangas ym. 2011). Metsien laserkeilauksessa käytetään matalatiheyksistä keilausaineistoa, jonka pulssitiheys on yleensä alle yksi pulssi neliometriä kohden. Yleisimpiä käytettyjä keilaimia ovat Leica- ja Optech-merkkiset keilaimet. Laserkeilaus voidaan toteuttaa joko lehdettömänä aikana tai keksällä lehtien ollessa puissa. Näitä kahta aineistoa ei kuitenkaan saa sekoittaa keskenään (Maltamo & Packalen 2014). Kuvassa 1 on nähtävissä esimerkkikuva laserkeilauksesta. Kuva havainnollistaa, kuinka laserpulssit leviävät kartiomaaisesti edetessään ilmakehän läpi keilaten maanpinnasta tietynsuuruisen alueen, jota kutsutaan laserpulssin jalanjäljeksi (footprint). Jalanjäljen suuruus voidaan määrittää laserpulssin hajonnan ja lentokorkeuden perusteella (Fernandez Diaz 2011). Hajontaan vaikuttaa olennaisesti keilaimen avauskulman suuruus. Laserkeilausperusteisessa kuviotason inventoinnissa käytettävillä keilaimilla on pieni jalanjälki, jonka suuruus vaihtelee yleensä 0,1-2,0 metrin välillä (Vauhkonen ym. 2014). Kuvan 1 oikeassa reunassa on nähtävissä esimerkkikuvaaja siitä, millaisia kaikuja laserkeilaimen valodektektori voi havaita, kun osa keilaimen lähettämästä energiasta heijastuu takaisin esimerkiksi

puista tai maan pinnasta. Kuvaajan x-akseli ilmaisee intensiteettiä ja y-akseli aikaa (Fernandez Diaz 2011).

Valodetektor voi siis havaita yhden tai useamman kaiun. Kaiuille annetaan useimmiten seuraavat luokkakoodit: 0 = ainoa kaiku, 1 = ensimmäinen kaiku monesta, 2 = välikaiku ja 3 = viimeinen kaiku monesta. Näiden luokkien perusteella kaiut jaetaan yleensä vielä niin sanottuihin ensimmäisiin ja viimeisiin kaikiin, joista johdettuja tunnuksia käytetään yleisesti puustotunnusten ennustamisessa. Ensimmäisten kaikujen tunnukset lasketaan käyttäen kaikuja, jotka ovat tulleet ensimmäisenä monista ja ainoana kaikuina (kaikutyyppit 0 ja 1), ja viimeisten kaikujen tunnukset käyttäen kaikuja, jotka ovat tulleet viimeisenä monista ja ainoana kaikuina (kaikutyyppit 0 ja 3). Muita laserkeilaukseen liittyviä tärkeitä termejä ovat keilausmoodi ja PRF (pulse repetition frequency) eli pulssintoistotaajuus. Keilausmoodilla tarkoitetaan sitä, onko ilmassa samaan aikaan useampia pulsseja (single vai multi pulse). Pulssitaajuus puolestaan mitataan hertseinä ja sen suuruus vaikuttaa erityisesti laskettujen lasertunnusten arvoihin. Yleisen norjalaisen suosituksen mukaan eri PRF-arvoja tulisi välttää saman inventointiprojektin yhteydessä (Næsset 2014).



Kuva 1. Esimerkkikuva laserkeilauksen toiminnasta. (Kuva: [Imaging Notes 2011](#))

Laserkeilauksella saadun aineiston lisäksi lopullisten kaukokartoitusperusteisten kuviotietojen tuottamiseen tarvitaan myös referenssikoealoja ja ilmakuvia. Referenssikoealat ovat tarkkoja geopaikannettuja koealoja, joiden tarkoituksena on edustaa hyvin inventoitavan alueen vaihtelua. Suomessa koealoja mitataan inventointialueittain yleensä keskimäärin noin 500 kappaletta nuorista ja varttuneista metsistä, sekä 150 koealaa taimikoista. Ilmakuvaukseen puolestaan käytetään suuriresoluutioisia ilmakuvauuskameroita ja kuvaus pyritään suorittamaan kesällä lehtien ollessa puissa, eli kuvausaikaa on noin kesäkuun puolestavälistä elokuun loppuun (Maltamo & Packalen 2014).

1.1.2 Kuviokohtainen ennustaminen

Puulajikohtaiset tunnuksat ennustetaan laserkeilausaineiston, maastokoealojen puustotunnusten ja ilmakuvatietojen avulla. Ilmakuvia tarvitaan pääasiassa puulajitunnistuksen parantamiseen. Estimointimenetelminä käytetään yleisesti ei-parametrisia lähimmän naapurin menetelmiä. Kun koko inventointialueelle on luotu mallit eri muuttujille, lasketaan puustotiedot 16 m x 16 m kokoisille hiloille. Hilatasolta puustotiedot yleistetään eteenpäin mikrokuviotasolle ja tätä kautta toimenpidekuviolle yhdistelemällä mikrokuvioita suuremmiksi kokonaisuuksiksi (Maltamo & Packalen 2014). Mikrokuviot ovat kooltaan keskimäärin 0,6 – 0,8 hehtaarin kokoisia puustoltaan homogeenisiä alueita ja ne muodostetaan käyttäen pohjatietona laserkeilauspohjaista pituusmallia (CHM = canopy height model) ja segmentointialgoritmeja. (Lepänen ym. 2008).

Lopputuloksena saadut ennusteet sisältävät tiedot männyn, kuusen ja lehtipuuston tilavuudesta, pohjapinta-alasta tai runkoluvusta, läpimitasta, pituudesta ja iästä, sekä joskus myös ennusteet mahdollisesta harvennusajankohdasta. Ennusteiden luotettavuudet ovat olleet hyviä mäntyvaltaisissa kohteissa Suomen itäisissä ja pohjoisissa osissa, mutta vastaavasti heikompia Suomen eteläisissä osissa, erityisen rehevien kohteiden ja sekametsien kohdalla (Maltamo & Packalen 2014). Tämän lisäksi taimikkokohteiden ennusteet eivät ole olleet tunnetusti kovinkaan luotettavalla tasolla. Taimikkokohteiden tapauksessa onkin tärkeämpää tieto seuraavasta metsänhoidollisesta toimenpiteestä, kuin tarkoista puulajikohtaisista ennusteista. Taimikkokohteiden toimenpidetarve voidaan ennustaa käyttäen kaukokartoitustunnuksia ja suoraa luokittelua, jolla voidaan päästä noin 70 prosentin luokittelutarkkuuteen (Korhonen ym. 2013).

1.2 Mallinnustekniikoista

Edellä mainittujen ei-parametrusten lähimmän naapurin menetelmien lisäksi metsikön puustotunnuksia voidaan estimoida laserkeilaustunnuksia käyttäen myös muilla mallinnustekniikoilla. Esimerkiksi hehtaarikohtaisia puuston kokonaistunnuksia voidaan pyrkiä mallintamaan parametrusten menetelmien avulla. Näistä yleisin on OLS-menetelmä (ordinary least squares), jossa pyritään löytämään mallin parametrit, jotka minimoivat residuaalien neliöiden summan (Mehtätalo & Lappi 2014). Muita mahdollisia vaihtoehtoja OLS-estimoinnin rinnalla ovat esimerkiksi SUR- (seemingly unrelated regression) ja PLS-menetelmät (partial least-squares). Tämän lisäksi jossain tapauksissa hyvä vaihtoehto voi olla myös GLS-menetelmä (generalized linear model), jonka avulla voidaan ottaa huomioon residuaalien heteroskedastisuus ja residuaalien välinen korrelaatio (Mehtätalo & Lappi 2014). Näiden lisäksi yleinen mallinnusmenetelmä on myös GLM-estimointi (generalized linear model), jota on käytetty esimerkiksi läpimittajakaumien parametrien estimointiin laserkeilaustunnusten avulla (Breidenbach 2008a). Parametrisiin malleihin kuuluvat myös niin sanotut sekamallit, jotka koostuvat kiinteistä ja satunnaisista vaikutuksista. Kiinteitä vaikutuksia kuvaava malli eli yksisuuntainen varianssialyysin malli on populaation osaryhmien vertailun yksinkertaisin mallityyppi, jossa mukana ovat kaikki kiinnostavat käsittelyt. Kiinteiden vaikutusten mallissa ainoana vaihteluna voidaan pitää ryhmän saamaa käsittelyä. Satunnaisvaikutusten mallissa puolestaan oletetaan, että käsittelyt ovat otos käsittelyjen populaatiosta, joiden satunnaisvaikutuksia käsitellään riippumattomina satunaismuuttujina (Nummi 2005).

1.3 Aikaisemmin mitattujen maastokoealojen hyödyntäminen uusissa hankkeissa

Laserkeilauspohjaisessa metsävaratiedon inventoinnissa käytettävien maastokoealojen mittaus on kallista ja hyvin aikaa vievää. Tämän johdosta onkin pohdittu, voitaisiinko jo aikaisemmin mitattuja koealoja hyödyntää uusien alueiden inventoinnissa. Aihealuetta on kuitenkin tutkittu vielä melko vähän. Næsset ym. (2004) lähestyivät ongelmaa käyttäen kahta eri inventointialuetta. Tutkimuksessa vertailtiin OLS-, SUR- ja PLS -regressiomenetelmillä muodostettuja inventointialueiden yhteisiä malleja OLS-menetelmällä muodostettuihin aluekohtaisiin malleihin. Næssetin ym. (2004) mukaan jo aikaisemmin mitattua koeala-aineistoa voisi olla hyvin mahdollista hyödyntää uuden inventointiprojektin yhteydessä erityisesti, jos inventointialueiden maastotunnusten ja laserkeilaustunnusten väliset riippuvuudet pysyvät suhteellisen samoina siirryttäessä alueelta toiselle. Tämän lisäksi olisi huolehdittava, että aikaisemmin mitattu koeala-aineisto edustaisi uutta aluetta riittävän kattavasti. Regressiomenetelmien välil-

lä ei ollut merkittäviä eroja. Næsset ym. (2004) kuitenkin suosittelivat yleisten mallien estimointiin OLS-menetelmää, erityisesti tulosten suoraviivaisen tulkinnan ja käytettävissä olevien tehokkaiden muuttujavalintamenetelmien takia.

Suvanto ja Maltamo (2008) ovat puolestaan perehtyneet aihealueeseen sekamallien näkökulmasta. Heidän tutkimuksessaan käytettiin Matinsalon ja Juuan inventointialueiden laserkeilausaineistoja ja koealatietoja. Tutkimuksessa verrattiin OLS-menetelmällä muodostettujen mallien koealakohaisten tunnusten ennustetarkkuuksia sekamallien vastaaviin ennustetarkkuuksiin käyttäen molempia aineistoja. OLS- ja sekamallit muodostettiin järjestelmällisesti eri koealamäärillä ottamalla Juuan alueelta tietyn suuruisia otoksia. OLS-estimoinnissa Matinsalon aineisto yhdistettiin suoraan Juuan alueen otoksen kanssa, mutta sekamalleissa Matinsalon aineistoa käytettiin niin sanottuna mallien ”apudatana”. Tutkimuksen tuloksia verrattiin myös Juuan inventointialueen otosten perusteella muodostettujen aluekohtaisten mallien ennustetarkkuuksiin. Suvannon ja Maltamon (2008) tulosten mukaan sekamallien käyttö tavallisen OLS-estimoinnin sijasta parantaa selvästi alueiden ennustetarkkuuksia. Tutkimus kuitenkin osoittaa, että vain 40 – 50 koealalla pystytään muodostamaan aluekohtaiset mallit, jotka tuottavat vähintään yhtä hyviä tilavuuden ja pohjapinta-alan ennusteita kuin käytettäessä Matinsalon lisäaineistoa OLS- tai sekamallien yhteydessä. Tämän lisäksi Breidenbach ym. (2008b) ovat ennustaessaan kuviokohtaisia puustotunnuksia kahden erillisen inventointiaineiston avulla osoittaneet, että sekamallien avulla saadaan tarkempia ennusteita ja erityisesti pienempiä ennusteiden harhoja kuin malleilla, jotka sisältävät vain kiinteitä vaikutuksia. Breidenbachin ym. (2008b) tutkimuksen mukaan yleinen sekamalli pystyy kuvaamaan hyvin kahden erillisen inventointialueen aineistoja. Yleinen sekamalli on heidän mukaansa myös helppo kalibroida uudelle inventointialueelle pienellä koealajoukolla.

1.4 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän työn tavoitteena oli selvittää kuinka hyviä puuston kokonaistilavuus- ja valtapituusennusteita voitaisiin saavuttaa laserkeilauspohjaisilla malleilla käyttäen aluekohtaisten mallien sijasta koko Suomen kattavaa yleistä mallia. Aluekohtaiset ja yleiset mallit muodostettiin referenssikoealojen avulla käyttäen estimointimenetelmänä OLS-estimointia. Mallien validointi suoritettiin koealatasolla käyttäen ”jätä-yksi-pois” -ristiinvalidointia. Yleisten mallien ja aluekohtaisten mallien ennustetarkkuuksien erojen avulla voitiin lopuksi vertailla kuinka tarkkoja ennusteita yleisillä malleilla voidaan saavuttaa. Tämän lisäksi tavoitteena oli testata, kuinka

hyvin yleisellä mallilla tuotetut aluekohtaiset ennusteet paranisivat uudelleensovitettaessa yleisiä malleja pienellä, inventointialuetta hyvin edustavalla, koealajoukolla.

2. AINEISTO

Tässä tutkimuksessa käytettiin yhdeksää Suomen Metsäkeskuksen inventointihanketta eri puolilta Suomea. Jokaiselta hankkeelta olivat käytössä maastossa mitatut koealat ja laserpis-
teet kyseisiltä koealoilta. Kaikkien hankkeiden laserkeilausaineistot oli keilattu kesäaikaan
vuosina 2011 – 2013. Laserkeilausaineistot toimittivat Blom Kartta ja Terratec, mutta aineis-
tot ovat vapaasti saatavilla Maanmittauslaitoksen www-sivulla ([http://www.maanmittauslai-
tos.fi/avoindata/hankinta](http://www.maanmittauslai-
tos.fi/avoindata/hankinta)). Koeala-aineistot saatiin Suomen Metsäkeskukselta. Taulukkoon 1
on listattu tässä työssä käytetyt inventointihankkeet.

Taulukko 1. Työssä käytetyt Suomen Metsäkeskuksen inventointialueet, inventointivuosi, aineiston toimittaja ja mallinnuksessa käytettyjen koealojen lukumäärä.

Inventointialue	Inventointivuosi	Toimittaja	Mallinnuksessa käytetyt koealat
Kolari	2013	TerraTec	534
Tornio	2013	Blom Kartta	596
Ranua	2012	Blom Kartta	613
Siikalatva	2013	Blom Kartta	657
Toholampi	2012	Blom Kartta	587
Ähtäri	2013	TerraTec	1233
Sulkava	2011	Blom Kartta	570
Virolahti	2013	TerraTec	724
Turku	2012	Blom Kartta	716

2.1 Maastoaineisto

Koealamittausprosessissa merkillepantavia asioita ovat koealojen sijoittelu, paikannus ja siir-
täminen, erilaiset koealatyypit, sekä mitattavat ja määritettävät tunnuksat. Tässä tutkimukses-
sa hyödynnettiin inventointialueiden lukupuuaineistoja, ympyräkoalojen tyyppitietoja ja
koealojen koordinaattitietoja. Varsinaiset taimikoiden runkolukukoealat ja koealojen taimik-
ko-ositteet jätettiin pois lopullisesta mallinnusaineistosta. Tämän tutkimuksen kannalta tär-
keimmät mitatut puustotiedot olivat läpimitta, pituus ja puulaji. Inventointialueiden koeala-
mittauksissa ei ollut käytössä yhtenäistä maasto-ohjeistusta, mutta ohjeistukset voidaan kui-
tenkin jakaa neljään eri ryhmään: 1) Siikalatvan, Toholammin, Sulkavan, Virolahden ja Turun
alueiden koealatiedot oli mitattu Suomen Metsäkeskuksen virallisen maastotyöohjeen perus-
teella, 2) Ähtäriin koealatiedot VMI:n (valtakunnan metsien inventointi) ja Suomen Metsäkes-
kuksen yhteisprojektissa, 3) Kolarin koealatiedot TerraTecin maastotyöohjeen mukaan ja 4)
Tornion ja Ranuan koealatiedot Blom Kartan maastotyöohjeen avulla. Maastotyöohjeistusten
ja mittaustapojen ymmärtäminen oli erittäin tärkeää, jotta eri inventointialueiden lukupuuai-

neistoita saatiin muodostettua mahdollisimman yhdenmukaiset. Seuraavassa on käyty läpi eri maastotyöohjeiden pääpiirteet.

2.1.1 Suomen Metsäkeskuksen virallinen maastotyöohje koealamittaukseen

Metsäkeskuksen virallisen maastotyöohjeen mukaan koealat ovat kiinteäsäteisiä ja ne sijoitetaan maastoon samalla periaatteella kuin VMI:ssä, mutta kuitenkin tiheämmällä ja ositetulla koealaverkolla. Osituksessa käytetään olemassa olevaa kuvioaineistoa ja ositemuuttujina kuvion alaryhmää, pääpuulajia, pääpuulajin osuutta, pohjapinta-alaa ja keskiläpimittaa. Koealat sijoitetaan pääasiassa metsämaalle ja ne pyritään sijoittamaan ryppäisiin siten, että siirtymiset maastossa saataisiin minimoitua. Koealojen paikannus tapahtuu metsäkeskuksen omalla paikannussovelluksella ja sijaintitiedot tallennetaan WGS84-koordinaatistossa. Paikannuksen apuna käytetään VRS-palveluun (Virtual Reference Station) perustuvaa sijainninkorjausta.

Maastotyöohjeen mukaan koealamittauksessa käytetään kolmea erilaista koealatyyppiä, jotka ovat: 1) varttuneen puuston lukupuukoeala, 2) taimikon lukupuukoeala ja 3) taimikkokoeala. Varttuneen puuston lukupuukoealaa käytetään kehitysluokkien 02, 03 ja 04 kuviolla. Yleisin käytetty koealan säde on 9 metriä, mutta puustoltaan harvoissa kohteissa voidaan hyödyntää myös 12,62 metrin sädettä. Varttuneen puuston lukupuukoealalla mitataan kaikki puut, joiden läpimitta on vähintään 5 cm. Läpimitaltaan 3 – 4,9 cm puista mitataan ne, joiden pituus ylittää puolet keskipituudesta. Taimikon lukupuukoealoilla käytetään 5,64 metrin sädettä ja sitä hyödynnetään hoidetuissa riukuvaiheen T2-taimikoissa. Taimikon lukupuukoealalla lukupuiksi lasketaan kaikki läpimitaltaan vähintään 3 senttimetriä ja pituudeltaan vähintään 4 metriä olevat puut. T1-luokan taimikot ja hoitamattomat T2-luokan taimikot mitataan varsinaisina taimikkokoealoina. Taimikkokoeala muodostuu neljästä 2,82 metrin runkolukukoealasta 9 metrin koealan sisällä.

Työohjeen mukaan koealaa voidaan siirtää, jos se ei mahdu kokonaan samalle kuviolle tai kuvion ennakkotieto on vanhentunut. Tällöin koealan keskipistettä pyritään siirtämään mahdollisimman lyhyt matka sellaiseen suuntaan, että kyseessä oleva koeala pysyy alkuperäisellä kuviolla. Ohjeen mukaan koeala siirretään osituksessa ennalta määritetyn tyyppiselle kuviolle, jos ei voida olla varmoja alkuperäisestä kuviosta. Koealaa voidaan myös siirtää, jos mittauspaikka osoittautuu työn kannalta liian haastavaksi. Koeala voidaan hylätä, jos epäillään, että kohdetta on käsitelty laserkeilauksen (tai ilmakuvauksen) ja koealamittauksen välillä. Tämän lisäksi taimikkokoealaoja voidaan siirtää, jos taimikkokoealalle osuu siemen- tai jättöpuita.

Metsäkeskuksen maastotyöohjeen mukaan koealoilta mitataan tai arvioidaan kuviokohtaiset tunnukset, toimenpidetarpeet, luku- ja koepuutunnukset sekä varsinaisten taimikkokoealojen keski- ja koepuutunnukset. Määritettäviä kuviotunnuksia ovat pääryhmä, alaryhmä, kasvupaikkaluokka, kasvupaikkaluokan lisämääre, kuivatustilanne, kehitysluokka, pääpuulaji, mahdollinen hakkuutapa ja hakkuuajankohta, mahdollinen uudistustapa ja uudistettava puulaji, mahdollinen maanpinnan käsittely sekä mahdolliset metsänhoitotyöt ja niiden kiireellisyys. Lukupuille määritetään puunumero, puulaji, puuluokka (elävä tai kuollut), ja mitataan rinnan korkeusläpimitta. Lukupuiden pituudet lasketaan VMI-perusteisilla malleilla, joiden kalibrointiin tarvitaan koepuita. Koepuut valitaan maastotallentimen avulla jokaisesta puulajiositteesta pohjapinta-alamediaanipuun perusteella. Koepuista mitataan pituus ja ikä arvioidaan yleensä oksakiehkuroiden avulla.

2.1.2 VMI-SMKI -maastotyöohje koealamittaukseen

VMI-SMKI -maastotyöohjeen merkittävin ero Suomen Metsäkeskuksen viralliseen maastotyöohjeeseen verrattuna on, että VMI-SMKI -mittauksessa koealaverkko sijoitetaan systemaattisesti. Koealat sijoitetaan L-kirjaimen muotoisiin 8 koealan ryppäisiin 250 metrin välein toisistaan. Koealaryypäitä mitataan 4,3 kilometrin välein. Samanlaista koealaverkkoa käytetään VMI:ssä. Koealojen täysin systemaattisen sijoittamisen takia koealoja on mitattava alueelta yli kaksinkertainen määrä Suomen Metsäkeskuksen viralliseen maastotyöohjeistukseen verrattuna (taulukko 1). VMI-SMKI -koealamittauksen maastotyöryhmillä on käytössään kaksi GPS-laitetta koealojen paikannukseen. Niin sanottua käsi-GPS -laitetta käytetään suunnistukseen ja koealojen keskipisteiden määrittämiseen ja tarkkuus-GPS -laitetta tarkkojen paikkakoordinaattien määrittämiseen.

VMI-SMKI -ohjeen mukaan koealoilta mitataan tai arvioidaan tietoja kolmelta eri tasokokoluokalta: 1) kuviotasolta, 2) puutasolta lukupuukoealoilta ja koepuista sekä 3) runkolukukoealoilta. Kuviotason tiedot määritetään kaikilta metsikkökuviolta, jotka 9 metrin koealaympyrä leikkaa. Tärkeimpiä kuviolta määritettäviä tietoja ovat kuvionumero, maaluokka, mitaustapa, kasvupaikan päätyyppi, kasvupaikkatyyppin lisämääre, kuivatustilanne, kehitysluokka, koealatyyppi, pääpuulaji, tehty hakkuu ja sen ajankohta, mahdollinen hakkuuehdotus, mahdollinen uudistamistapa ja maanpinnan käsittely, mahdollinen metsänhoitotyö koealan kohdalla, hakkuiden ja metsänhoitotöiden kiireellisyys sekä koealan käytettävyys laserkeilausaineiston tulkinassa. Koealan keskipisteen kohdalla olevalle kuviolle merkitään kaikki kuviotiedot. Sivukuvioiden merkittävät tiedot riippuvat kyseessä olevan kuvion maaluokasta.

Mitattavat lukupuut valitaan maastotyöohjeen mukaan puiden rinnankorkeusläpimitan perusteella. Vähintään 4,5 senttimetrin läpimittaiset puut luetaan 9 metrin kiinteäsäteisiltä koealoilta. Yhdeksän metrin sädettä käytetään kaikilla muilla koealoilla paitsi taimikoissa ja hakkuuaukeilla. Taimikoissa ja hakkuuaukeilla säde on 5,64 metriä. Kaikilta koealoilta mitataan myös kolme kiinteäsäteistä 1,05 metrin osakoealaa, joilta mitataan kaikki alle 4,5 senttimetrin läpimittaiset puut. Lukupuille määritetään koeala- ja osakoealatunniste, kuvionumero, puunumero, puulaji, puuluokka, ja mitataan läpimitta, sekä puun suunta ja etäisyys koealan keskipisteeseen verrattuna. Puuluokkia ovat elävä puu, kaatunut elävä puu, kuollut pystypuu ja kaatunut kuollut puu. Lukupuiksi lasketaan tämän lisäksi myös kaikki puut, jotka tulevat mukaan 9 metrin etäisyydellä koealan keskipisteestä relaskooppikertoimella 1,5. Taimikkoealoilta mitataan lukupuukoealojen lisäksi myös runkolukukoealoja. Runkolukukoeala on ainoa VMI-SMKI -mittauksen koealatyyppi, jota voidaan siirtää.

VMI-SMKI -maastotyöohjeen mukaan kiinteäsäteisten koealojen koepuita mitataan vain silloin, kun lukupuita mitataan keskipistekuviolta. Kiinteäsäteisten koealojen koepuut valitaan puulajiryhmittäin. Ensimmäisen ryhmän muodostavat mänty ja kaikki muut havupuut kuusta lukuun ottamatta, toisen ryhmän kuusi ja kolmannen kaikki lehtipuut. Koepuiden läpimitan on oltava vähintään 4,5 senttimetriä ja ne valitaan mediaanipuun perusteella. Tämän lisäksi koepuita mitataan erikseen myös relaskooppikoealoilta. Koepuista mitataan pituus ja määritetään ikä. Koepuita käytetään tässäkin tapauksessa pituusmallien paikalliseen kalibrointiin.

2.1.3 TerraTecin maastotyöohje koealamittaukseen

TerraTecin maastotyöohjeen mukaan Kolarin koealoilta mitatut koealatiedot voidaan jakaa yleistietoihin, kuviotietoihin ja puustotietoihin. Yleistietoina ilmoitetaan projektinumero, inventointipäivä, mittausmaa ja mittausryhmän numero. Kuviotietoja ovat koealanumero, kasvupaikkatyyppi, ravinteisuus, kehitysluokka ja koealan säde. Koealan säteinä voidaan käyttää mittauksesta riippuen joko 9 tai 12,62 metriä. Taimikoissa käytetään pääsääntöisesti 5,64 metrin koealasädettä. Taimikoissa suositellaan kuitenkin käytettäväksi 9 metrin koealasädettä, jos näkyvyys koealalla on erittäin huono. Taimikkoealojen säteenä voidaan myös käyttää 12,62 metriä, jos koealalla on vähemmän puita kuin 900 kappaletta hehtaaria kohden.

Maastotyöohjeen mukaan puustotiedoiksi kirjataan puun numero, jakso, puulaji, rinnankorkeusläpimitta, ikä, pituus, laatu, runkoluku taimikoissa, sekä mahdolliset käsittelyvaihtoehdot ja käsittelyvuodet. Puun jakso määritetään sen mukaan kuuluuko kyseessä oleva puu vallitsevaan jaksoon, alikasvokseen vai onko kyseessä ylispuu. Puun laatu jaetaan puolestaan neljään

luokkaan: 1) normaali puu, 2) elävä katkennut puu, 3) kuollut puu ja 4) pystykanto. Rinnan- korkeusläpimitta mitataan vähintään 5 senttimetrin paksuisista puista ja ikä määritetään erikseen jokaiselle puulajiositteelle tai jaksolle. Edeltävistä maastotyöohjeista poiketen puiden pituudet mitataan kaikista läpimittaehdon täyttävistä lukupuista. Työohjeen mukaan koealaa voi siirtää, jos se ei mahdu kokonaisuudessaan yhdelle metsikkökuviolle. Koeala voidaan puolestaan hylätä, jos kyseessä olevalla kuviolla on tehty toimenpiteitä keilauksen (tai ilma- kuvauksen) ja koealamittauksen välisenä aikana.

2.1.4 Blom Kartan maastotyöohje koealamittaukseen

Blom Kartan maastotyöohje on suunniteltu mittauksen suorittaneiden alihankkijoiden käyttöön. Nuorissa ja harventamattomissa metsissä käytetään 9 metrin ja käsitellyissä ja varttuneissa 12,65 metrin koealasädettä. Nuorten ja varttuneiden metsien koealoilla lukupuiksi määritetään kaikki puut, joiden läpimitta on vähintään 5 senttimetriä. Taimikkokohteilta mitataan lukupuukoealojen lisäksi myös säteeltään 5,64 metrin runkolukukoealoja. Runkolukukoealoilta lasketaan jaksoittain kaikki alle 5 senttimetrin läpimittaiset puut. Jokaiselle taimikkojaksolle määritetään myös mediaanipuun tiedot. Taimikkokoealojen mittaustulokset ovat oltava yleistettävissä 9 metrin säteelle.

Maastotyöohjeen mukaan puustotietojen tallennus tapahtuu elektronisten mittasaksien avulla (Masser caliper). Koealoille ilmoitetaan mittausryhmän numero, mittauspäivämäärä ja mittaustmaa. Koealojen yleistunnuksiksi määritetään koealan päivittäinen järjestysnumero, koeala numero, kasvupaikka, kehitysluokka, koealan säde ja vallitsevan puuston ikä. Lukupuille ilmoitetaan puunumero, puulaji ja puun laatu, sekä mitataan rinnankorkeusläpimitta ja pituus. Puun laatuluokat jaotellaan sen mukaan, onko kyseessä oleva puu elävä, kuollut vai pystykanto. Tämän lisäksi puut jaotellaan omiin luokkiinsa, jos elävän puun runko on kallellaan tai sen runko on poikki. Koealojen siirtäminen on mahdollista erityisesti, jos koealapisteen puusto ei vastaa ennakkotietoja tai jos koeala on kuvioiden rajalla.

2.2 Laserkeilausaineisto

Inventointialueiden laserkeilausaineistot oli keilattu kesäaikaan vuosina 2011 – 2013. Keilausajankohdat sijoittuivat pääasiassa kesä- ja elokuun välille. Laserkeilauksessa käytettiin Optech- ja Leica-merkkisiä keilaimia ja neljää eri keilainyksilöä. Optechin keilaimia käytettiin kaikkiaan seitsemällä inventointialueella, käyttäen kahta eri keilainyksilöä. Lentokorkeus

vaihteli inventointialueittain 1730 – 2000 metrin ja pulssintoistotaajuus 50000 – 71800 hertsin välillä. Keilauksen avauskulman puolikkaana käytettiin Kolarin, Siikalatvan ja Sulkavan inventointialueella 15 astetta ja muilla inventointialueilla 20 astetta. Kaikki inventointialueet keilattiin käyttäen keilausmoodia, jossa ilmassa on vain yksi kaiku kerrallaan (single pulse). Kaikki inventointialuekohtaiset tiedot laserkeilaimista on listattu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Inventointialuekohtaiset tiedot laserkeilauksissa käytetyistä keilainmerkeistä, keilainyksilöistä (A-D), keilausajankohdista, lentokorkeuksista, pulssifrekvensseistä (hz) ja avauskulmista (asteina).

Inventointialue	Keilain	Yksilö	Aikaikkuna	Lentokorkeus (m)	PRF (hz)	Avauskulman puolikas
Kolari	ALTM Optech Gemini	B	07.06. – 06.08.2013	1950	50000	15
Tornio	Leica ALS 70-HA	C	13.06. – 04.08.2013	1950	71000	20
Ranua	ALTM Optech Gemini	A	04.07. – 24.08.2012	1750	70000	20
Siikalatva	ALTM Optech Gemini	B	12.06. – 20.06.2013	1950	50000	15
Toholampi	ALTM Optech Gemini	B	28.06. – 03.07.2012	1750	70000	20
Ähtäri	ALTM Optech Gemini	A	28.06. – 27.08.2013	1730	70000	20
Sulkava	ALTM Optech Gemini	A	31.07. – 04.09.2011	2000	50000	15
Virolahti	Leica ALS 70-HA	D	25.06. – 03.07.2013	1900	71800	20
Turku	ALTM Optech Gemini	B	13.06. – 22.06.2012	1750	70000	20

2.3 Inventointialuekohtaisten aineistojen käsittely ja yhdistäminen

Työssä käytetty aineisto tarvitsi paljon ennakkokäsittelyä, jotta siitä saatiin muodostettua mahdollisimman yhtenäinen kokonaisuus mallinnusta varten. Erityisesti inventointialuekohtaisten maastoaineistojen muodot erosivat toisistaan. Tavoitteena oli luoda aineistokokonaisuus, joka sisältää tiedot kaikista mitattujen koealojen perustiedoista, lukupuista ja laserpisteistä. Aineiston käsittelyn helpottamiseksi kaikille inventointialueille annettiin ensimmäisenä omat projektikoodit, jonka jälkeen jokainen koeala ja mitattu puu numeroitiin juoksevasti inventointialueiden mukaan. Tämän jälkeen jokaisen numeroidun lukupuun yhteyteen tallennettiin tiedot puiden läpimitoista, pituuksista ja puulajeista. Tämän lisäksi jokaiselle laserpisteelle oli määritettävä oikea koealatieto, joka onnistui korkeuspisteiden ja koealojen x- ja y-koordinaattitietojen avulla. Muita tärkeitä laserpisteiden tietoja olivat laserpisteiden korkeudet suhteessa maanpintaan (dZ) ja pisteiden kaikutyytit. Ympyräkoalojen perustietoja olivat koealojen keskipisteiden x- ja y-koordinaatit, säteet ja kehitysluokat.

Tässä työvaiheessa ongelmia aiheuttivat erityisesti koeala-aineistojen ja lukupuutietojen käsittely. Esimerkiksi Siikalatvan, Toholammin, Sulkavan ja Turun projektien lukupuutiedostojen otsikkorivit olivat puutteelliset ja Kolarin alueen puustotiedot olivat Masserin saksien formaatissa (eli yhden päivän tiedot oli tallennettu omaan tiedostoonsa). Kolarin alueen lukupuista

oli myös poistettava mitatut pystykannot ja kuolleet puut, joita ei kyseessä olevan inventointialueen kohdalla ollut suodatettu. Tämän lisäksi Ranuan ja Tornion koealojen koordinaattitietoja ja säteitä ei ollut suoraan saavavilla. Kyseessä olevat tiedot saatiin kuitenkin muodostettua koealojen shapefile-tiedostojen avulla. Koordinaattipisteiden muodostus onnistui paikkatieto-ohjelmiston avulla muuttamalla koealapolygonit pisteiksi ja tallentamalla tämän jälkeen pisteiden koordinaatit ominaisuustietoihin. Koealojen säteet laskettiin koealojen pinta-aloista ympyrän pinta-alan kaavan avulla.

Aineiston yhdenmukaistamiseksi maastoaineistoa oli myös muokattava tietyin ehdoin. Maastoaineistoista poistettiin kaikki koealat, joiden kehitysluokkia olivat A0, Y1, S0 tai 05. Kaikista projekteista poistettiin myös kaikki runkolukukoealat ja runkolukuositteet runkolukuositteiden mediaanipuiden pienen läpimitan takia. Tämän lisäksi aineistosta rajattiin pois kaikki puut, joiden läpimitta oli vähemmän kuin 5 senttimetriä. Sulkavan alueella koeala-aineistosta oli myös poistettava kaksi 04 kehitysluokan koealaa ja yksi 02 kehitysluokan koeala, koska lukupuutiedostosta ei löytynyt kyseisille koealoille yhtään lukupuuta. Lisäksi Siikalatvan alueella oli poistettava kahdeksan koealaa, joiden lukupuiden tietoja ei jostain syystä ollut ilmoitettu. Lopuksi poistettiin kaikki koealat, joille oli rajausten jälkeen jäänyt vain yksi lukupuu ja koealat, joilla esiintyi muita havupuita kuin mäntyjä tai kuusia. Ainoastaan yhden lukupuun sisältävät koealat olivat kehitysluokaltaan T1 ja T2 luokan taimikoita. Aineiston muut havupuut olivat inventointialueesta riippuen ilmaistu joko yleistunnuksella tai puulajikohtaisella tunnuksella. Muita havupuita olivat esimerkiksi kataja, kontortamänty, lehtikuusi ja pihta.

3. MENETELMÄT

3.1 Puustotunnusten laskenta

Puustotunnuksista laskettiin tilavuus (V) ja valtapituus (Hdom). Tilavuudet laskettiin hehtaarikohtaisesti männylle, kuuselle, koivulle ja muille lehtipuille, sekä kaikille puulajeille yhteensä.

Puiden tilavuudet laskettiin Laasasenahon kahden selittäjän malleilla (1982). Kaikkien lehtipuiden laskentaan käytettiin Laasasenahon koivun tilavuusmallia.

$$\text{Mänty} \quad v = 0,036089d^{2,01395}(0,99676)^dh^{2,07025}(h-1,3)^{-1,07209} \quad (1)$$

$$\text{Kuusi} \quad v = 0,022927d^{1,91505}(0,99146)^dh^{2,82541}(h-1,3)^{-1,53547} \quad (2)$$

$$\text{Koivu} \quad v = 0,011197d^{2,10253}(0,98600)^dh^{3,98519}(h-1,3)^{-2,65900} \quad (3)$$

missä v on tilavuus, d rinnankorkeusläpimitta ja h pituus.

Valtapituus tarkoittaa sadan läpimitaltaan paksuimman puun aritmeettista keskipituutta hehtaarilla (Kangas ym. 2011). Tätä varten laskettiin jokaiselle koealalle sen pinta-alan perusteella vertailuluku, josta tiedettiin, monestako koealan suurimmasta puusta keskipituus on laskettava. Koealakohtaisten puustotunnusten laskennan jälkeen poistettiin aineistosta kaikki koealat, joiden tilavuus oli vähemmän kuin 3 kuutiometriä hehtaaria kohden. Taulukossa 3 on esitetty tilavuuksien minimi- ja maksimi-arvot, keskiarvot ja kvartiilit männylle, kuuselle, koivulle, muille lehtipuille ja kaikille puille yhteensä. Vastaavat arvot valtapituudelle on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 3. Aineiston koealojen hehtaarikohtaisten tilavuuksien minimi, maksimi, 1. kvartiili, mediaanit, 3. kvartiili ja keskiarvot puulajeittain sekä kaikille puulajeille yhteensä.

Tilavuus (m ³ /ha)	Minimi	1. Kvartiili	Mediaani	Keskiarvo	3. Kvartiili	Maksimi
Mänty	0,0	8,3	54,2	71,8	110,5	572,4
Kuusi	0,0	0,0	3,7	40,5	41,1	839,3
Koivu	0,0	0,0	5,0	21,3	25,2	406,4
Muu lehtipuu	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	581,5
Yhteensä	3,0	63,1	114,1	134,9	184,3	915,5

Taulukko 4. Aineiston koealojen valtapituuksien minimi, maksimi, 1. kvartiili, mediaani, 3. kvartiili ja keskiarvo.

Hdom (m)	Minimi	1. Kvartiili	Mediaani	Keskiarvo	3. Kvartiili	Maksimi
Yhteensä	3,89	12,09	15,92	15,97	19,51	32,89

3.2 Lasertunnusten laskenta

Ennen laserkeilausaineiston korkeus- ja tiheystunnusten laskentaa laserkeilausaineistoa rajattiin korkeusmuuttujan perusteella. Ehdoksi asetettiin, että mukaan otetaan kaikki ne pisteet, joiden korkeus on vähintään -2, mutta pienempi kuin 33 metriä. Pisteet, jotka saivat korkeudeksi enemmän kuin 33 metriä, saivat jo niin suuria arvoja, etteivät ne voineet olla enää puuston korkeuspisteitä. Rajauksen jälkeen kaikille jäljellejääneille negatiivisille korkeusarvoille annettiin arvo nolla. Korkeus- ja tiheystunnukset laskettiin koealoittain erikseen ensimmäisille ja viimeisille kaiuille. Tunnuksina käytettiin kaikujen keskiarvoja (hav_{GF} ja hav_{GL}), keskihaajontoja ($hstd_F$ ja $hstd_L$), viittä korkeuskvartiilia ($h20/40/60/80/95_F$ ja $h20/40/60/80/95_L$) ja viideltä eri korkeudelta laskettua prosentuaalista tiheystunnusta ($veg1/5/10/15/20_F$ ja $veg1/5/10/15/20_L$). Laskettujen tunnusten minimi- ja maksimiarvot, kvartiilit ja keskiarvot on esitetty taulukossa 5.

Usein korkeuskvartiileille ja tiheystunnuksille lasketaan myös vaihtoehdot, jossa pisteaineistosta rajataan kaikki maapisteet aineiston ulkopuolelle. Tässä työssä testattiin muuttujia, joiden korkeuspisteiden alarajaksi asetettiin yksi metri. Näiden tunnusten perusteella muodostetut yleiset mallit eivät kuitenkaan ennustaneet paremmin tilavuutta tai valtapituutta kuin mallit, joissa oli käytetty alkuperäisiä muuttujia. Näin ollen kyseessä olevat muuttujavaihtoehdot jätettiin työn ulkopuolelle.

Korkeuskvartiilit laskettiin 20, 40, 60, 80 ja 95 prosentin välein erikseen ensimmäisille ja viimeisille kaiuille. Tunnusten laskennassa ei käytetty erillistä kynnysarvoa korkeuspisteiden rajaamiseen. Laskennassa käytetyn kvartiilin määritelmä on:

$$Q(p) = (1 - y)x[j] + yx[j + l] \quad (4)$$

missä $(j - m) / n \leq p < ((j - m + 1) / n)$, $x[j]$ on j :nnen kertaluvun tilastotieto, n on otoskoko, y :n arvo on $j = \text{floor}(np + m)$ ja $g = np + m - j$ funktio, jossa m on:

$$m = 1 - p. \quad p[k] = (k - 1) / (n - 1) \quad (5)$$

kun $p[k] = \text{mode}[F(x[k])]$ ja $Q(p)$ on p :n jatkuva funktio. (R 3.1.2, quantile-funktion tyyppi 7)

Prosentuaaliset tiheystunnukset laskettiin 1, 5, 10, 15 ja 20 metrin välein erikseen ensimmäisille ja viimeisille kaiuille, laskemalla kyseessä olevan korkeuden alle jääneiden pisteen osuus koko koealan pisteiden määrästä. Tunnusten laskennan jälkeen aineistosta poistettiin yksi koeala, jolle ei aineistosta löytynyt yhtään korkeuspistettä. Pistedata saattoi tämän koealan kohdalla olla joko puutteellinen tai kyseisen koealan koordinaattitiedot eivät olleet oikeat.

Taulukko 5. Aineiston laserkeilausaineistosta laskettujen korkeus ja tiheystunnusten minimi, maksimit, 1. kvartiilit, mediaanit, 3. kvartiilit ja keskiarvot.

Tunnus	Minimi	1. Kvartiili	Mediaani	Keskiarvo	3. Kvartiili	Maksimi
havg _F	0,11	3,74	6,14	6,63	9,04	23,52
hstd _F	0,29	2,97	4,44	4,56	5,92	12,26
h20 _F	0,00	0,00	0,05	2,05	3,06	21,34
h40 _F	0,00	0,12	4,16	5,10	8,85	23,20
h60 _F	0,00	4,47	8,26	8,32	11,97	25,41
h80 _F	0,05	7,12	10,76	10,84	14,29	27,87
h95 _F	0,15	9,12	12,91	13,01	16,46	30,27
veg1 _F	2,64	50,35	66,87	65,24	82,74	100,00
veg5 _F	0,00	36,77	56,91	54,06	75,00	100,00
veg10 _F	0,00	2,07	26,79	30,91	53,80	100,00
veg15 _F	0,00	0,00	0,37	11,29	14,06	97,90
veg20 _F	0,00	0,00	0,00	2,50	0,00	88,11
havg _L	0,02	1,62	3,25	3,88	5,48	18,80
hstd _L	0,03	2,92	4,55	4,70	6,28	11,95
h20 _L	0,00	0,00	0,00	0,11	0,01	16,49
h40 _L	0,00	0,01	0,06	1,06	0,20	21,58
h60 _L	0,00	0,09	0,36	3,63	6,53	24,21
h80 _L	0,00	2,10	8,06	8,08	12,85	27,30
h95 _L	0,08	8,36	12,41	12,30	16,07	30,12
veg1 _L	0,00	21,99	36,66	37,84	51,97	98,65
veg5 _L	0,00	13,21	27,76	29,69	43,20	94,02
veg10 _L	0,00	1,33	13,48	18,51	30,91	85,33
veg15 _L	0,00	0,00	0,23	7,53	9,85	81,18
veg20 _L	0,00	0,00	0,00	1,75	0,00	75,26

3.3 Mallinnus, mallien valinta ja ristiinvalidointi

Tässä työssä käytettiin estimointimenetelmänä OLS-estimointia, johon mallinnettaviksi tunnuksiksi valittiin puuston kokonaisrunkotilavuus ja valtapituus. Tavoitteena oli siis luoda yleinen tilavuus- ja valtapituusmalli koko Suomelle ja verrata näitä saman aineiston pohjalta luotuihin aluekohtaisiin malleihin. Mallinnuksessa hyödynnettiin kaikkia aineiston koealoja. Tilavuutta pyrittiin selittämään kahdella ja valtapituutta yhdellä selittäjällä. Mallien selittäjinä käytettiin laserkeilausaineiston korkeus- ja tiheysmuuttujia, sekä niiden neliöjuuri-, logaritmi- ja toisen asteen polynomimuunnoksia. Selittävien muuttujien määrä pidettiin alhaisena, jotta mallit olisivat yksinkertaisia ja helposti tulkittavia. Tämän lisäksi tilavuudelle ja valtapituudelle

delle testattiin myös selitettävän muuttujan neliöjuurimuunnosta. Niin yleiset kuin aluekohtaisetkin mallit muodostettiin samalla periaatteella. Tilavuuden muuttujavalinnassa määritettiin kaikki mahdolliset kahden selittäjän selittäjäyhdistelmät, jonka jälkeen luoduilla selittäjäyhdistelmillä sovitettiin lineaariset mallit sekä laskettiin mallien absoluuttiset ja suhteelliset RMSE:t. Lopullisen mallin muodoksi valittiin se selittäjäyhdistelmä, jonka RMSE sai pienimmän arvon. Myös valtapituuden selittävä muuttuja valittiin pienimmän RMSE:n periaatteen avulla. Pienin RMSE ei ole välttämättä aina optimaalisin ratkaisu muodoltaan parhaimman mallivaihtoehdon valintaan. Tässä työssä kyseessä oleva yksinkertainen kriteeri oli kuitenkin perusteltu ratkaisu suuren mallijoukon takia.

Yleisiä malleja verrattiin aluekohtaisiin malleihin ristiinvalidoinnin avulla. Yleisten mallien ristiinvalidointi toteutettiin jättämällä aineistosta vuorotellen pois yksi inventointialue, jonka jälkeen yleiset mallit sovitettiin jäljelle jääneillä inventointialueilla ("jätä-inventointialue-pois" -ristiinvalidointi). Poisjätetyn inventointialueen tilavuudet ja valtapituudet voitiin tämän jälkeen ennustaa kyseisellä mallilla. Vertailutasoksi yleisten mallien ristiinvalidoinnille toteutettiin aluekohtaisten mallien ristiinvalidointi täydellä koealamäärällä. Aluekohtaisten mallien ristiinvalidoinnissa jätettiin vuorotellen pois yksi koeala ja sovitettiin mallit muilla alueen koealoilla ("jätä-koeala-pois" -ristiinvalidointi). Ristiinvalidoitujen mallien ennusteita verrattiin tämän jälkeen koealojen mitattuihin arvoihin ja laskettiin inventointialuekohtaiset suhteelliset RMSE:t ja harhat.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$RMSE\% = 100 * \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (7)$$

$$HARHA = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (8)$$

$$HARHA\% = 100 * \frac{HARHA}{\bar{y}} \quad (9)$$

jossa

y_i = muuttujan y mitattu arvo koealalla i

\hat{y}_i = muuttujan y estimoitu arvo koealalla i

\bar{y} = muuttujan y mitattujen arvojen keskiarvo

n = koealojen lukumäärä

Selitettävän muuttujan neliöjuurimuunnoksen takia osalle valituista malleista oli suoritettava myös epälineaarisen ennustuksen harhan korjaus (Lappi 1993). Eli, jos

$$\sqrt{y} = f(x) + \epsilon_i \quad (10)$$

niin harhattomuuskorjaus saadaan suoraan kaavalla:

$$E(y) = f(x)^2 + \sigma^2 \quad (11)$$

jossa

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (12)$$

3.4 Yleisten mallien uudelleensovitus

Työn viimeisessä vaiheessa testattiin, millaisia tuloksia voitaisiin saada mittaamalla inventointialueelta vain 150 aluetta hyvin edustavaa koealaa ja uudelleensovittamalla yleiset mallit tällä koealajoukolla. Uudelleensovitetun yleisen tilavuusmallin ja valtapituusmallin vertailutaksoksi muodostettiin uudet aluekohtaiset mallit, suorittamalla selittäjävalinta ja mallien sovitus uudelleen 150 koealan otosaineistossa. Aluekohtaisten mallien valinta suoritettiin tässäkin työvaiheessa pienimmän RMSE:n perusteella. Uudelleensovitetuilla yleisillä malleilla ja uusilla aluekohtaisilla malleilla ennustettiin kokonaistilavuudet ja valtapituudet inventointialueittain otoksen ulkopuolelle jääneille koealoille. Tämän lisäksi vastaavat ennusteet laskettiin inventointialueen otoksen ulkopuolelle jääneille koealoille myös suoraan yleisillä malleilla, käyttäen hyödyksi ”jätä-inventointialue-pois” -ristiinvalidointia. Kyseessä oleva ristiinvalidointi suoritettiin tässä työvaiheessa uudestaan, sillä otoksen ulkopuolelle jääneiden koealojen perusteella laskettu suhteellinen RMSE ei välttämättä ole täysin sama kuin täydellä koealamäärällä suoritettun ristiinvalidoinnin RMSE.

Uudelleensovituksessa käytettävät koealat valittiin ositetulla satunnaisotannalla, erikseen jokaiselta inventointialueelta, ilman palautusta. Ositteina käytettiin kehitysluokkia. Ositteiden otoskoot inventointialueittain määritettiin jokaisen ositteen suhteellisen koealamäärän avulla. Käyttämällä ositteina kehitysluokkia ja ositteen otoskokona suhteellista koealamäärää varmistuttiin siitä, että kaikki kehitysluokat tulivat hyvin edustetuiksi. Muodostetuille ennusteille laskettiin suhteelliset RMSE:t ja harhat. Huomioitavaa on, että mallien ennustetarkkuudet vaihtelevat luonnollisesti otoksesta ja otoksen ulkopuolelle jääneistä koealoista riippuen. Tä-

män takia satunnaisotosta toistettiin 100 kertaa. Otantakertojen RMSE- ja harhakeskiarvojen, sekä vastaavien keskihajontojen perusteella voitiin tarkastella kuinka suuri vaihtelu otantakertojen välillä on havaittavissa. Erilaisesta laskentatavasta johtuen tämän osion tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia edeltävän osan tulosten kanssa, joten tulokset käsitellään tässä työssä kahtena erillisenä kokonaisuutena.

4. TULOKSET

4.1 Yleiset ja aluekohtaiset mallit

Yleinen tilavuusmalli on:

$$\sqrt{V} = 0,75957 + 3,35837 * \sqrt{havg_F} + 0,01002 * h95_L^2 \quad (13)$$

jolloin harhattomuuskorjaus eli σ^2 -arvo on 2,09721. Tällöin absoluuttinen RMSE on 37,47 m³/ha ja suhteellinen RMSE 27,77 prosenttia.

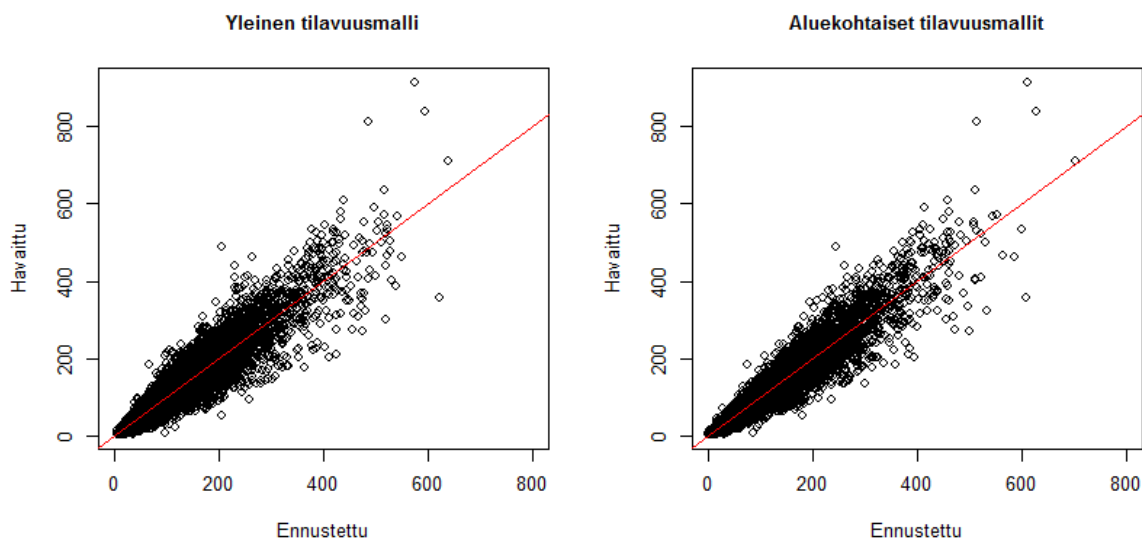
Aluekohtaisten tilavuusmallien muodot sekä niiden suhteelliset ja absoluuttiset RMSE:t on esitetty taulukossa 6. Harhaa ei tässä tapauksessa ole ilmoitettu, koska se on mallinnusaineistoa käytettäessä nolla. Kyseisten mallien kertoimet ja y-muuttujan neliöjuurimuunnoksesta aiheutuvat harhattomuuskorjaukset on listattu taulukkoon 7. Kuvan 2 kuvaajissa on esitetty yleisen tilavuusmallin ja aluekohtaisten mallien ennusteet (m³/ha) havaittujen tilavuuksien (m³/ha) suhteen.

Taulukko 6. Aluekohtaisten tilavuusmallien muodot ja mallien absoluuttiset (m³/ha) ja suhteelliset (%) RMSE:t.

Inventointialue			RMSE (m ³ /ha)	RMSE %
Kolari	$\sqrt{V} = \beta_0 + \beta_1 * \sqrt{havg_F} + \beta_2 * hstd_L^2$	(14)	21,67	21,48
Tornio	$V = \beta_0 + \beta_1 * havg_F + \beta_2 * hstd_L^2$	(15)	23,38	24,05
Ranua	$\sqrt{V} = \beta_0 + \beta_1 * h95_F + \beta_2 * \sqrt{havg_L}$	(16)	22,68	23,07
Siikalatva	$\sqrt{V} = \beta_0 + \beta_1 * h80_F^2 + \beta_2 * veg1_F^2$	(17)	29,37	24,88
Toholampi	$\sqrt{V} = \beta_0 + \beta_1 * \sqrt{havg_F} + \beta_2 * \sqrt{veg20_L}$	(18)	24,77	24,10
Ähtäri	$\sqrt{V} = \beta_0 + \beta_1 * havg_F + \beta_2 * \sqrt{hstd_F}$	(19)	34,48	24,68
Sulkava	$\sqrt{V} = \beta_0 + \beta_1 * hstd_L + \beta_2 * \sqrt{havg_F}$	(20)	46,40	26,76
Virolahti	$\sqrt{V} = \beta_0 + \beta_1 * havg_F + \beta_2 * h95_F$	(21)	45,04	25,10
Turku	$\sqrt{V} = \beta_0 + \beta_1 * \sqrt{havg_L} + \beta_2 * h95_L^2$	(22)	39,43	21,80

Taulukko 7. Aluekohtaisten tilavuusmallien kertoimet β_1 , β_2 ja β_3 , sekä y-muuttujan neliöjuurimuunnoksen takaisinmuunnoksessa tarvittavat harhattomuuskorjaukset σ^2 .

Inventointialue	β_0	β_1	β_2	σ^2
Kolari	0,84604	3,56017	0,11138	0,96069
Tornio	-7,41134	10,39201	3,12703	-
Ranua	0,28119	0,40077	3,05428	1,12152
Siikalatva	4,60760	0,02875	0,00044	1,48169
Toholampi	-0,97887	4,61386	0,70838	1,15451
Ähtäri	-0,43889	0,80775	3,04136	1,55199
Sulkava	-1,05973	0,88009	2,88910	3,06790
Virolahti	2,37038	0,76539	0,21389	2,42347
Turku	0,29097	4,25146	0,00886	1,88614



Kuva 2. Kuvaajissa on yleisen tilavuusmallin, sekä aluekohtaisten mallien, ennusteet (m^3/ha) esitettyinä havaittujen tilavuuksien (m^3/ha) suhteen.

Yleinen valtapituusmalli on:

$$HDOM = 3,13604 + 0,98620 * h95_F \quad (23)$$

jolloin absoluuttinen RMSE on 1,07 metriä ja suhteellinen RMSE 6,71 prosenttia.

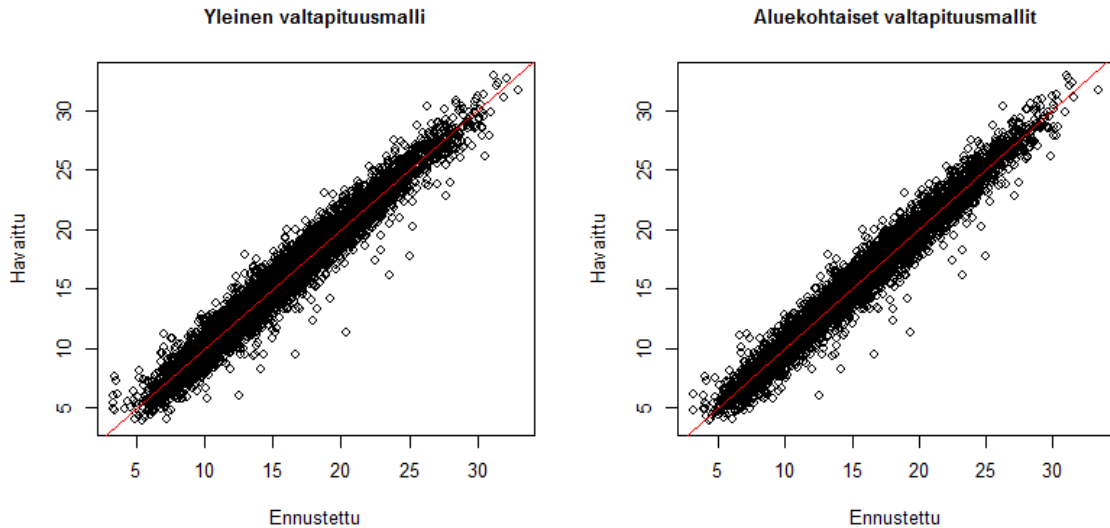
Aluekohtaisten valtapituusmallien muodot, sekä niiden suhteelliset ja absoluuttiset RMSE:t on esitetty taulukossa 8. Kyseisten mallien kertoimet ja y-muuttujan neliöjuurimuunnoksesta aiheutuvat harhattomuuskorjaukset on listattu taulukkoon 9. Kuvan 3 kuvaajissa on esitetty yleisen valtapituusmallin ja aluekohtaisten mallien ennusteet (m) havaittujen valtapituuksien (m) suhteen.

Taulukko 8. Aluekohtaisten valtapituusmallien muodot ja mallien absoluuttiset (m) ja suhteelliset (%) RMSE:t.

Inventointialue			RMSE (m ³ /ha)	RMSE %
Kolari	$HDOM = \beta_0 + \beta_1 * h95_F$	(24)	1,00	7,21
Tornio	$HDOM = \beta_0 + \beta_1 * h95_F$	(25)	0,86	6,79
Ranua	$HDOM = \beta_0 + \beta_1 * h95_F$	(26)	0,96	7,42
Siikalatva	$HDOM = \beta_0 + \beta_1 * h95_F$	(27)	0,81	5,20
Toholampi	$\sqrt{HDOM} = \beta_0 + \beta_1 * \sqrt{h95_F}$	(28)	0,86	5,82
Ähtäri	$HDOM = \beta_0 + \beta_1 * h95_F$	(29)	1,05	6,28
Sulkava	$\sqrt{HDOM} = \beta_0 + \beta_1 * \sqrt{h95_F}$	(30)	1,27	6,82
Virolahti	$HDOM = \beta_0 + \beta_1 * h95_F$	(31)	0,97	5,45
Turku	$HDOM = \beta_0 + \beta_1 * h95_L$	(32)	1,02	5,43

Taulukko 9. Aluekohtaisten valtapituusmallien kertoimet β_1 ja β_2 , sekä y-muuttujan neliöjäärimuunnoksen takaisinmuunnoksessa tarvittavat harhattomuuskorjaukset σ^2 .

Inventointialue	β_0	β_1	σ^2
Kolari	2,92211	1,00127	-
Tornio	2,05340	0,99243	-
Ranua	2,73380	1,00471	-
Siikalatva	3,77501	0,95423	-
Toholampi	0,97624	0,84173	0,01319
Ähtäri	3,82207	0,95253	-
Sulkava	0,84980	0,87276	0,02604
Virolahti	3,31978	0,97627	-
Turku	4,03791	0,97453	-



Kuva 3. Kuvaajissa on esitetty yleisen valtapituusmallin, sekä aluekohtaisten mallien, ennusteet (m) havaittujen valtapituuksien (m) suhteen.

4.2 Mallien ristiinvalidointi kaikilla aineiston koealoilla

Seuraavassa on esitetty ”jätä-yksi-pois” -ristiinvalidoinnin tulokset tilavuudelle ja valtapituudelle. Taulukoissa 10 on esitetty ”jätä-inventointialue-pois”- ja ”jätä-koeala-pois”-ristiinvalidoinnin tulokset tilavuuden suhteelliselle RMSE:lle ja harhalle. Yleisen tilavuusmallin ristiinvalidoinnin tuloksena saatujen suhteellisten RMSE-arvojen ja harhojen maantieteellistä jakautumista on havainnollistettu kuvan 4 avulla. Kuvassa 4 on myös ilmoitettu inventointialueen keilainmerkit ja keilainyksilöiden tunnuksat.

Taulukko 10. ”Jätä-yksi-pois” -ristiinvalidoinnin inventointialuekohtaiset RMSE:t ja harhat tilavuudelle.

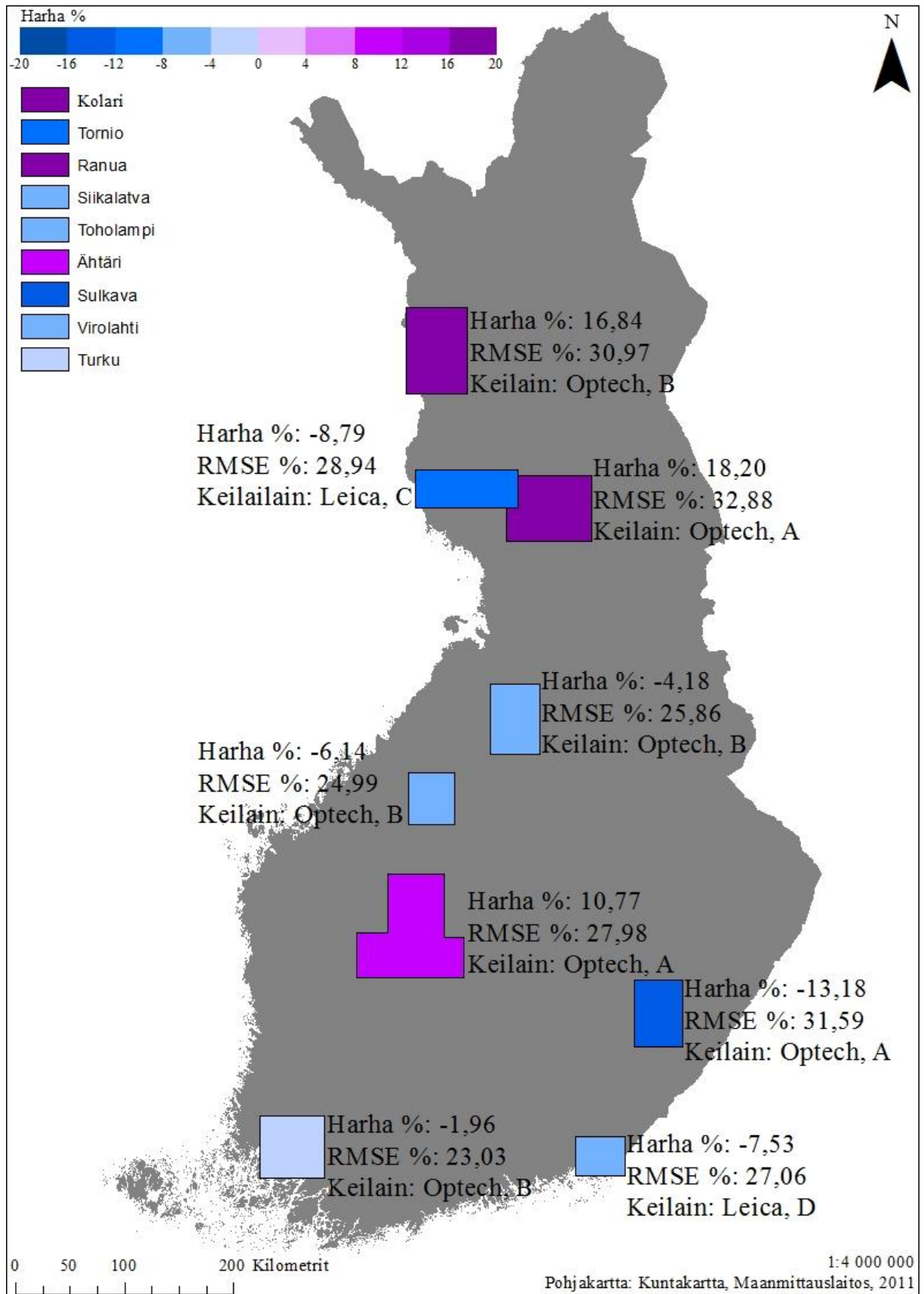
Inventointialue	Yleisen mallin RMSE %	Aluekohtaisen mallin RMSE %	Yleisen mallin harha %	Aluekohtaisen mallin harha %
Kolari	30,97	21,69	16,84	0,01
Tornio	28,94	24,25	-8,79	0,01
Ranua	32,88	23,20	18,20	0,00
Siikalatva	25,86	25,05	-4,18	-0,01
Toholampi	24,99	24,44	-6,14	0,00
Ähtäri	27,98	24,81	10,77	-0,01
Sulkava	31,59	26,91	-13,18	0,00
Virolahti	27,06	25,25	-7,53	0,00
Turku	23,03	21,95	-1,96	-0,01

Taulukoissa 11 on esitetty ”jätä-inventointialue-pois”- ja ”jätä-koeala-pois” -ristiinvalidoinnin tulokset suhteelliselle RMSE:lle ja harhalle. Yleisen valtapituusmallin ristiinvalidoinnin tuloksena saatujen suhteellisten RMSE-arvojen ja harhojen maantieteellistä jakautumista on

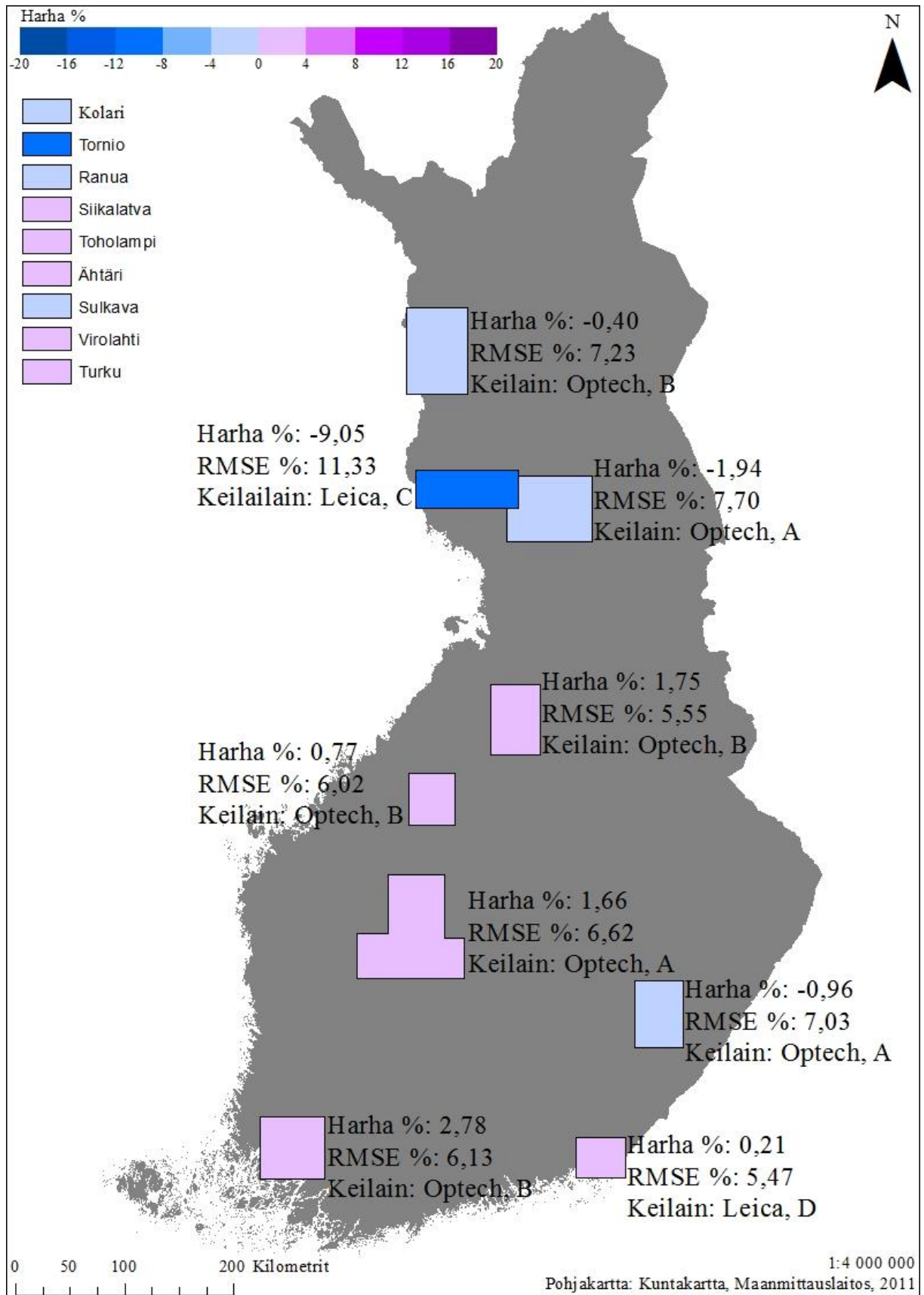
havainnollistettu kuvan 5 avulla. Kuvassa 5 on, kuvan 4 tapaan, ilmoitettu myös inventointi-alueiden keilainmerkit ja keilainyksilön tunnuksset.

Taulukko 11. ”Jätä-yksi-pois” -ristiinvalidoinnin inventointialuekohtaiset RMSE:t ja harhat valtapituudelle.

Inventointialue	Yleisen mallin RMSE %	Aluekohtaisen mallin RMSE %	Yleisen mallin harha %	Aluekohtaisen mallin harha %
Kolari	7,23	7,23	-0,40	0,00
Tornio	11,33	6,82	-9,05	0,00
Ranua	7,70	7,44	-1,94	0,00
Siikalatva	5,55	5,22	1,75	0,00
Toholampi	6,02	5,85	0,77	0,00
Ähtäri	6,62	6,29	1,66	0,00
Sulkava	7,03	6,84	-0,96	0,00
Violahti	5,47	5,46	0,21	0,00
Turku	6,13	5,45	2,78	0,00



Kuva 4. Kartassa on esitetty yleisen tilavuusmallin ristiinvalidoinnin tuloksena saadut suhteelliset RMSE:t ja harhat inventointialueittain. Inventointialueiden värit kuvaavat suhteellisen harhan muutosta maantieteellisesti. Tämän lisäksi kartassa on esitetty inventointialueiden keilainmerkit (Optech tai Leica) ja keilainyksilöiden tunnukset (A-D).



Kuva 5. Kartassa on esitetty yleisen valtapituusmallin ristiinvalidoinnin tuloksena saadut suhteelliset RMSE:t ja harhat inventointialueittain. Inventointialueiden värit kuvaavat suhteellisen harhan muutosta maantieteellisesti. Tämän lisäksi kartassa on esitetty inventointialueiden keilainmerkit (Optech tai Leica) ja keilainyksilöiden tunnukset (A-D).

4.3 Yleisten mallien uudelleensovitus pienellä koealajoukolla

Seuraavassa on esitetty ”jätä-inventointialue-pois” -ristiinvalidoitujen yleisten mallien, pienellä koealajoukolla uudelleensovitettujen yleisten mallien ja jokaisella otoskierroksella muodostettujen uusien aluekohtaisten mallien sadan toistokierroksen RMSE- ja harhakeskiarvot ennustettaessa otoksen ulkopuolelle jääneiden koealojen kokonaistilavuuksia ja valtapituuksia inventointialueittain. Taulukoissa 12 ja 13 on esitetty RMSE- ja harhakeskiarvot sekä keskihajonnat kokonaistilavuudelle. Vastaavat arvot valtapituudelle löytyvät taulukoista 14 ja 15.

Taulukko 12. Satunnaisotosten ulkopuolelle jääneiden koealojen tilavuusennusteiden suhteelliset RMSE-keskiarvot (RMSE-ka %) inventointialueittain yleisellä, uudelleensovitetulla yleisellä ja aluekohtaisella tilavuusmallilla. Inventointialuekohtaisten RMSE-keskiarvojen oikealla puolella oleva sd-arvo ilmaisee kyseessä olevien RMSE-arvojen keskihajonnan.

Inventointialue	Yleinen RMSE-ka %	Sd	Uudelleensovitettu RMSE-ka %	Sd	Aluekohtainen RMSE-ka %	Sd
Kolari	31,00	1,01	23,12	0,84	23,43	1,30
Tornio	28,85	1,36	26,49	1,49	26,60	3,27
Ranua	32,84	0,62	25,20	0,78	24,52	1,04
Siikalatva	25,75	0,69	25,80	0,83	26,69	1,49
Toholampi	24,94	0,49	24,66	0,80	26,64	1,79
Ähtäri	27,97	0,42	25,33	0,47	26,73	1,81
Sulkava	31,50	0,85	27,70	0,60	28,65	1,25
Virolahti	27,07	0,65	25,87	0,72	27,14	1,56
Turku	23,03	0,53	22,85	0,50	23,21	1,03

Taulukko 13. Satunnaisotosten ulkopuolelle jääneiden koealojen tilavuusennusteiden suhteelliset harha-keskiarvot (harha-ka %) inventointialueittain yleisellä, uudelleensovitetulla yleisellä ja aluekohtaisella tilavuusmallilla. Inventointialuekohtaisten harha-keskiarvojen oikealla puolella oleva sd-arvo ilmaisee kyseessä olevien harhojen keskihajonnan.

Inventointialue	Yleinen harha-ka %	Sd	Uudelleensovitettu harha-ka %	Sd	Aluekohtainen harha-ka %	Sd
Kolari	16,85	0,50	0,07	2,17	0,20	2,20
Tornio	-8,75	0,70	0,14	2,31	-0,29	2,32
Ranua	18,20	0,48	-0,14	2,29	-0,06	2,19
Siikalatva	-4,24	0,54	-0,21	2,28	-0,12	2,44
Toholampi	-6,13	0,65	0,08	2,43	-0,01	2,57
Ähtäri	10,76	0,25	-0,04	2,25	-0,24	2,33
Sulkava	-13,00	0,88	0,62	2,82	0,53	3,00
Virolahti	-7,49	0,50	0,23	2,22	0,17	2,49
Turku	-1,92	0,47	0,22	2,10	0,07	2,07

Taulukko 14. Satunnaisotosten ulkopuolelle jääneiden koealojen valtapituusennusteiden suhteelliset RMSE-keskiarvot (RMSE-ka %) inventointialueittain yleisellä, uudelleensovitetulla yleisellä ja aluekohtaisella valtapituusmallilla. Inventointialuekohtaisten RMSE-keskiarvojen oikealla puolella oleva sd-arvo ilmaisee kyseessä olevien RMSE-arvojen keskihajonnan.

Inventointialue	Yleinen RMSE-ka %	Sd	Uudelleensovitettu RMSE-ka %	Sd	Aluekohtainen RMSE-ka %	Sd
Kolari	7,22	0,18	7,27	0,17	7,30	0,19
Tornio	11,28	0,29	6,81	0,32	6,81	0,31
Ranua	7,68	0,16	7,47	0,16	7,50	0,20
Siikalatva	5,55	0,08	5,23	0,10	5,25	0,13
Toholampi	6,02	0,15	5,94	0,15	5,97	0,17
Ähtäri	6,62	0,08	6,34	0,08	6,37	0,12
Sulkava	7,02	0,28	6,93	0,25	6,92	0,44
Virolahti	5,45	0,10	5,48	0,11	5,53	0,16
Turku	6,13	0,11	5,50	0,13	5,53	0,12

Taulukko 15. Satunnaisotosten ulkopuolelle jääneiden koealojen valtapituusennusteiden suhteelliset harha-keskiarvot (harha-ka %) inventointialueittain yleisellä, uudelleensovitetulla yleisellä ja aluekohtaisella tilavuusmallilla. Inventointialuekohtaisten harha-keskiarvojen oikealla puolella oleva sd-arvo ilmaisee kyseessä olevien harhojen keskihajonnan.

Inventointialue	Yleinen harha-ka %	Sd	Uudelleensovitettu harha-ka %	Sd	Aluekohtainen harha-ka %	Sd
Kolari	-0,40	0,21	0,01	0,75	0,01	0,75
Tornio	-9,02	0,20	0,08	0,67	0,08	0,67
Ranua	-1,93	0,16	0,07	0,66	0,07	0,66
Siikalatva	1,76	0,10	0,04	0,44	0,03	0,44
Toholampi	0,77	0,15	0,01	0,57	0,03	0,59
Ähtäri	1,67	0,07	0,08	0,57	0,09	0,58
Sulkava	-0,93	0,18	0,13	0,66	0,15	0,67
Virolahti	0,21	0,10	-0,03	0,49	-0,03	0,49
Turku	2,78	0,09	-0,01	0,46	-0,01	0,47

5. TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Mallien ennustetarkkuudet mallinnusaineistossa ja mallien selittäjät

Taulukosta 6 voidaan havaita, että aluekohtaisten tilavuusmallien suhteellinen RMSE vaihtelee mallinnusaineistossa Kolarin 21,5 prosentin ja Sulkavan 26,8 prosentin välillä, yleisen mallin suhteellisen RMSE:n ollessa 27,8 prosenttia. Aluekohtaiset mallit tuottavat mallinnusaineistossa tarkempia ennusteita kuin yleinen malli, joka on havaittavissa myös kapeampana pisteparvena aluekohtaisten ennusteiden kuvaajassa (kuva 2). Toisin sanoen aluekohtaisten mallien ennusteet ovat mallinnusaineistossa lähempänä todellisia tilavuuksia kuin yleisen mallin ennusteet. Molempien kuvaajien kohdalla (kuva 2) ennusteiden hajonta kasvaa suurilla tilavuuksilla. Yleisen tilavuusmallin ennusteiden kuvaaja muistuttaa kuitenkin hyvin paljon aluekohtaisten mallien ennusteiden kuvaajaa.

Yleisen tilavuusmallin ja aluekohtaisten tilavuusmallien selittäjiä tarkasteltaessa huomataan, että ensimmäisten kaikujen keskiarvo toistuu kaikissa muissa paitsi Ranuan, Siikalatvan ja Turun aluekohtaisissa malleissa. Ensimmäisten kaikujen keskiarvon neliöjuurimuunnos valikoitui selittäjäksi yleiseen malliin sekä Kolarin, Sulkavan ja Toholammin aluekohtaisiin malleihin. Tornion, Ähtärin ja Virolahden aluekohtaisiin malleihin ensimmäisten kaikujen keskiarvo valikoitui ilman muunnosta. Yleisen tilavuusmallin toiseksi selittäjäksi valikoitui viimeisten kaikujen 95 prosentin korkeuskvartiilin toisen asteen polynomimuunnos, joka valikoitui tämän lisäksi vain Turun aluekohtaiseen malliin. Ensimmäisten kaikujen 95 prosentin korkeuskvartiili valikoitui kuitenkin ilman muunnosta Ranuan ja Virolahden aluekohtaisiin malleihin. Tämän lisäksi huomioitavaa on, että ainoastaan Tornion aluekohtaista mallia lukuun ottamatta yleiseksi malliksi ja aluekohtaisiksi malleiksi valikoituivat vaihtoehdot, joiden y-muuttujaan oli suoritettu neliöjuurimuunnos.

Aluekohtaisten valtapituusmallien RMSE vaihtelee mallinnusaineistossa Siikalatvan 5,2 prosentin ja Ranuan 7,4 prosentin välillä, yleisen mallin suhteellisen RMSE:n ollessa 6,7 prosenttia. Valtapituuden yleisten ja aluekohtaisten ennusteiden välillä ei mallinnusaineistossa ole kovinkaan suuria eroja, joka huomataan myös ennustettujen ja havaittujen valtapituuksien välisistä kuvaajista (kuva 3.). Yleisen mallin ja aluekohtaisten mallien ennusteiden kuvaajat ovat hyvin samankaltaiset. Pisteparvet ovat tämän lisäksi tasaisesti jakautuneet, joten valtapituusmallit tuottavat tarkkoja ennusteita kaikilla pituuksilla. Ennusteiden samankaltaisuus on luonnollista, sillä kaikkien mallien selittäjäksi valikoitui ensimmäisten kaikujen 95 prosentin

korkeuskvartiili. Ainoastaan Toholammin ja Sulkavan aluekohtaisissa malleissa ensimmäisten kaikujen 95 prosentin korkeuskvartiiliin ja y-muuttujaan oli valikoitunut neliöjuurimuunnos.

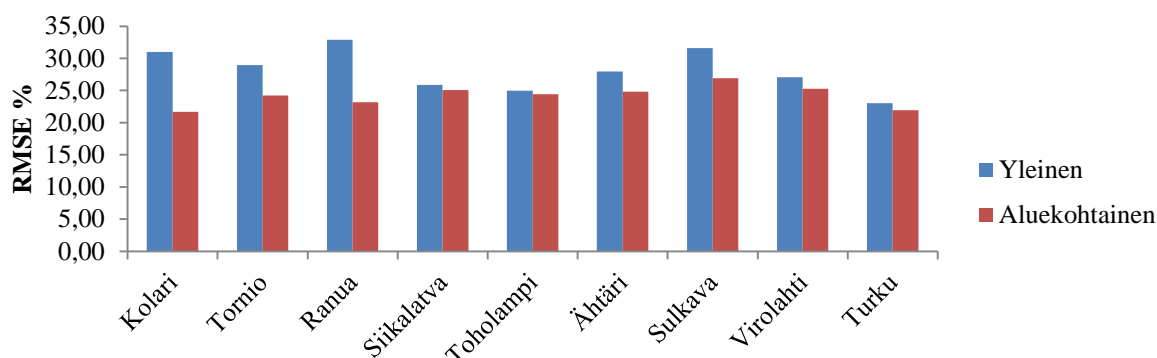
5.2 Yleisten ja aluekohtaisten mallien väliset erot ”jätä-yksi-pois” -ristiinvalidoinnissa

Yleisen tilavuusmallin ristiinvalidoituja ennustetarkkuuksia vertailtaessa aluekohtaisten mallien vastaaviin ennustetarkkuuksiin voidaan huomata (taulukko 10 ja kuva 6), että Siikalatvan, Toholammin, Virolahden ja Turun alueilla päästään RMSE:n näkökulmasta erittäin hyviin tuloksiin. Yleisten ja aluekohtaisten mallien suhteellisten RMSE-arvojen erot ovat näillä inventointialueilla vain 0,6 – 1,8 prosenttiyksikön välillä. Tornion, Ähtärin ja Sulkavan alueilla suhteellisten RMSE-arvojen erot ovat 3,2 – 4,7 prosenttiyksikön välillä. Suurimmillaan erot ovat Kolarin ja Ranuan inventointialueiden tapauksissa. Kolarin alueen yleisen tilavuusmallin ristiinvalidoitu RMSE eroaa 9,3 ja Ranuan 9,7 prosenttiyksikköä vastaavista aluekohtaisten mallein RMSE-arvoista.

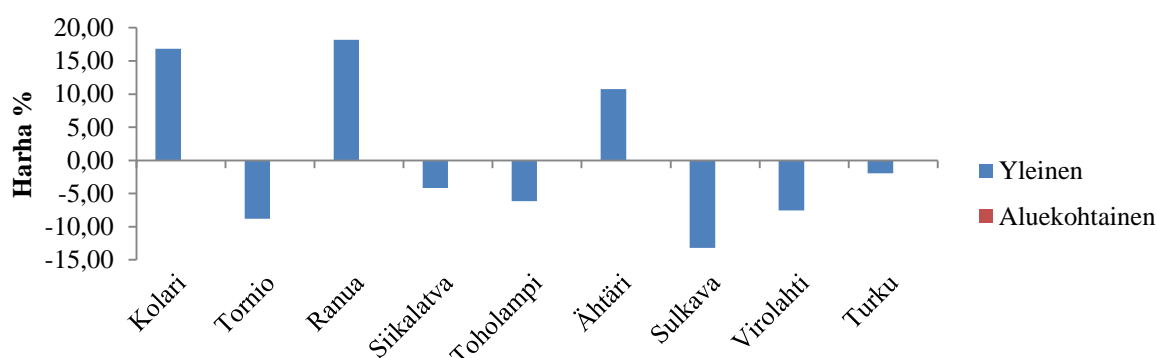
Taulukoista 10 ja kuvasta 7 kuitenkin huomataan, että yleisen tilavuusmallin merkittäväksi ongelmaksi muodostuu mallin harha. Harha on suurimmillaan Kolarin ja Ranuan inventointialueilla. Kolarin alueen harha on 16,8 ja Ranuan alueella jopa 18,2 prosenttia. Lähimpänä nollaa harha on Turun alueella, jossa se on vain -2,0 prosenttia. Muiden inventointialueiden harhat vaihtelevat -13,2 ja 10,8 prosentin välillä. Yleisen tilavuusmallin suurimmat harhat ovat keskittyneet siis Suomen pohjoisosiin. Lähimpänä nollaa harha on puolestaan Etelä-Suomessa. Muuta selkeää maantieteellistä harhojen jakautumista ei ole havaittavissa. Harhat vaihtelevat muualla Suomessa melko satunnaisesti. Aluekohtaiset tilavuusmallit ovat lähes harhattomia.

Yleistä tilavuusmallia voitaisiin pyrkiä parantamaan esimerkiksi luomalla yleiset mallit erikseen Pohjois- ja Etelä-Suomelle. Ongelmaksi tässä kuitenkin muodostuisi mallien maantieteellisten rajojen muodostaminen. Tarkan maantieteellisen rajan vetäminen Pohjois-Suomen ja Etelä-Suomen mallien välille olisi erittäin vaikeaa. Tämän takia ehkä parempi vaihtoehto olisikin sijoittaa suoraan x-koordinaatti yhdeksi mallin selittäjäksi. Yleisen tilavuusmallin harhan pienentämiseksi mallinnusvaiheessa testattiin myös mallivaihtoehtoa, jossa hyödynnettiin vain ensimmäisten kaikujen perusteella muodostettuja lasertunnuksia. Tämä oli perusteltua, sillä viimeisissä kaiuissa on yleensä enemmän sensorista johtuvaa vaihtelua kuin ensimmäisissä kaiuissa. Pienimmän RMSE:n perusteella valittua ainoastaan ensimmäisten kaikujen tunnuksia sisältävää mallivaihtoehtoa ei kuitenkaan otettu jatkokäsittelyyn, sillä mallin muoto ei ollut erityisen hyvä. Kyseessä oleva mallivaihtoehto yliarvioi ennusteita erittäin pal-

jon suurilla tilavuuksilla. Inventointialuekohtainen harha voitaisiin saada myös todennäköisesti pienemään kalibroimalla yleinen tilavuusmalli inventointialueittaisella kalibrointiker-toimella tai sekamallien avulla.

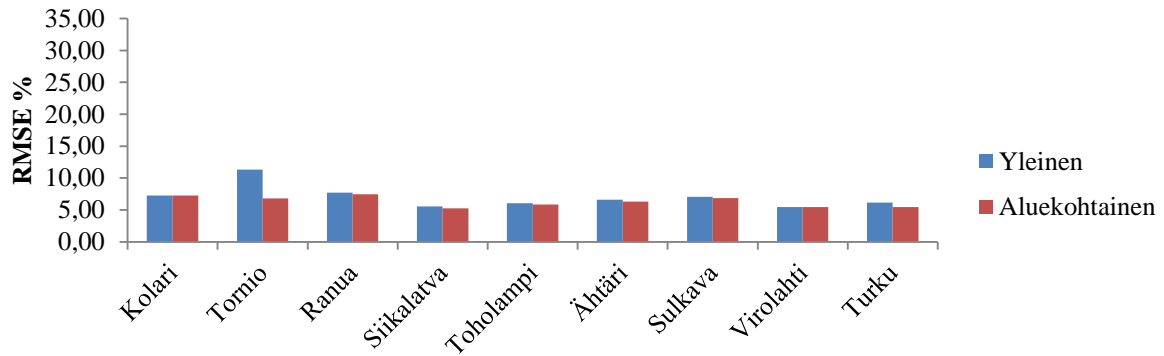


Kuva 6. Tilavuusennusteiden suhteellisten RMSE-arvojen erot käytettäessä yleistä ja aluekohtaista mallia eri inventointialueilla. Yleisen ja aluekohtaisen mallin suhteellinen RMSE on laskettu ”jätä-yksi-pois” -ristiinvalidoinnin avulla käyttäen kaikkia aineiston koealoja.

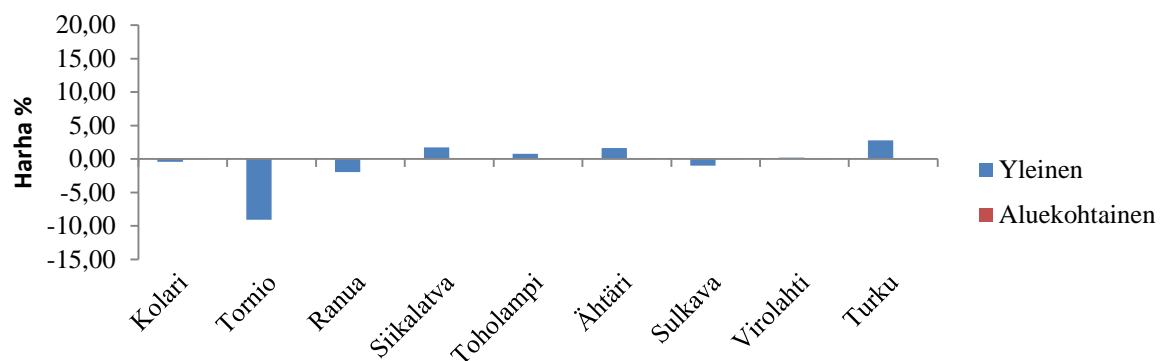


Kuva 7. Tilavuusennusteiden suhteellisten harhojen erot käytettäessä yleistä ja aluekohtaista mallia eri inventointialueilla. Yleisen ja aluekohtaisen mallin suhteellinen harha on laskettu ”jätä-yksi-pois” -ristiinvalidoinnin avulla käyttäen kaikkia aineiston koealoja.

Yleisen mallin ja aluekohtaisten valtapituusmallien suhteellista RMSE:tä vertailtaessa huomataan (taulukko 11 ja kuva 8), että yleinen malli toimii Tornion aluetta lukuun ottamatta erittäin hyvin jokaisella inventointialueella. Suhteellisten RMSE-arvojen erot ovat hyvin pieniä, vain 0,0 – 0,7 prosenttiyksikköä. Tornion inventointialueella suhteellisten RMSE-arvojen ero on 4,5 prosenttiyksikköä. Myöskään harha ei ole merkittävää muilla kuin Tornion alueella (taulukko 11 ja kuva 9). Tornion inventointialueen harha on -9,1 prosenttia. Merkittävin harha osuu siis tässäkin tapauksessa Pohjois-Suomeen, mutta muuta trendiä ei harhojen maantieteellisessä jakautumisessa ole havaittavissa. Aluekohtaiset valtapituusmallit ovat harhattomia.



Kuva 8. Valtapituusennusteiden suhteellisten RMSE-arvojen erot käytettäessä yleistä ja aluekohtaista mallia eri inventointialueilla. Yleisen ja aluekohtaisen mallin suhteellinen RMSE on laskettu ”jätä-yksi-pois” -ristiinvalidoinnin avulla käyttäen kaikkia aineiston koealoja.



Kuva 9. Valtapituusennusteiden suhteellisten harhojen erot käytettäessä yleistä ja aluekohtaista mallia eri inventointialueilla. Yleisen ja aluekohtaisen mallin suhteellinen harha on laskettu ”jätä-yksi-pois” -ristiinvalidoinnin avulla käyttäen kaikkia aineiston koealoja.

5.3 Laserkeilaimen vaikutus RMSE- ja harha-arvoihin

Yleisen tilavuusmallin ja aluekohtaisen mallin välisiä RMSE-eroja (taulukko 10) vertailtaessa keilainyksilöihin (taulukko 2) voidaan havaita, että Optechin keilainyksilön B inventointialueiden erot ovat keskimääräisesti pienempiä kuin keilainyksilön A. Molempien keilainyksilöiden kohdalla on kuitenkin havaittavissa hyvin suuria RMSE-eroja alueilla, jotka sijaitsevat Suomen pohjoisosissa (Kolari ja Ranua). Tästä voidaankin päätellä, että keilainyksilöllä on vaikutusta tilavuuden ennustetarkkuuksiin Pohjois-Suomea lukuun ottamatta. Suomen pohjoisosissa on havaittavissa myös yksi selvä poikkeus: Tornion alueella RMSE-arvojen erot eivät nouse yhtä korkeiksi kuin Kolarin ja Ranuan alueella. Voisikin olla mahdollista, että Leican keilainyksilöä C käytettäessä voitaisiin viereisilläkin alueilla saavuttaa yhtä hyviä ennusteita kuin Tornion alueella. On myös mahdollista, että Leican keilaimen käyttö aliarvioi tilavuutta, mutta mallin soveltaminen Pohjois-Suomeen yliarvioi sitä, joten lopputuloksesta tulee sattumalta hyvä. Tämän lisäksi Leican toisen keilainyksilön (D) inventointialueella pääs-

tään pienempään RMSE-eroon kuin Tornion inventointialueella. Tämä on kuitenkin luonnollista, sillä kyseisen keilaimen inventointialue sijaitsee Etelä-Suomessa (Virolahti).

Yleisen tilavuusmallin ristiinvalidoitujen ennusteiden inventointialuekohtaisia harhoja (taulukko 10) vertailtaessa keilainyksilöihin (taulukko 2) voidaan huomata, että Optechin keilainyksilön A inventointialueilla harhat ovat keskimääräisesti paljon korkeampia kuin muiden keilainyksilöiden alueilla. Harhaa tarkasteltaessa voidaankin todeta, että pohjoisinta Suomea lukuun ottamatta Optechin keilainyksilö A poikkeaa Optechin keilainten keskiarvosta enemmän kuin keilainyksilö B. Harhankin tapauksessa Leican keilain tuottaa Suomen pohjoisosissa parempia tuloksia kuin Optechin keilaimet. Leican keilainyksilöiden välillä harhojen ero ei ole kovin suuri.

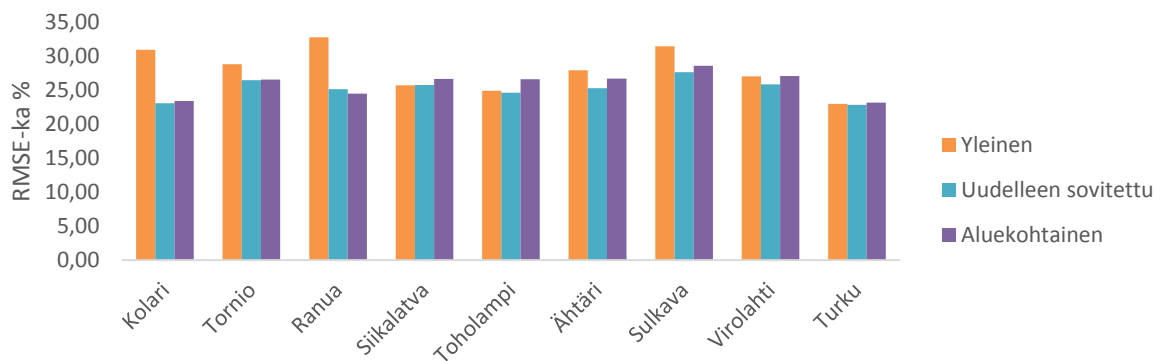
Tämän lisäksi tilavuuden inventointialuekohtaisia RMSE-arvojen eroja ja harhoja (taulukko 10) vertailtaessa inventointialuekohtaisiin pulssintoistotaajuuksiin (taulukko 2) voidaan havaita tiettyä jakautumista inventointialueiden välillä. RMSE-arvojen erot ja ristiinvalidoitujen yleisten tilavuusmallien harhat ovat keskimääräisesti suurempia, kun inventointialueen avauskulman puolikkaana on käytetty 15 astetta ja pulssintoistotaajuutena 50000 hertsiä, kuin alueilla, joilla vastaavat arvot ovat olleet 20 astetta ja noin 70000 hertsiä. Valtapituuden tapauksessa inventointialuekohtaisia RMSE-arvojen eroja ja yleisen valtapituusmallin harhoja (taulukko 11) vertailtaessa keilainyksilöihin (taulukko 2) voidaan havaita, että keilainyksilöllä tai keilainmallilla ei ole suoranaaisesti vaikutusta erojen suuruuksiin. Ainoa poikkeus on Tornion alue. Havainto on mielenkiintoinen, sillä Tornion alueella saavutettiin tilavuuden kohdalla paljon parempia tuloksia kuin viereisillä Kolarin ja Ranuan alueilla.

5.4 Uudelleensovitettujen yleisten mallien ennustetarkkuudet

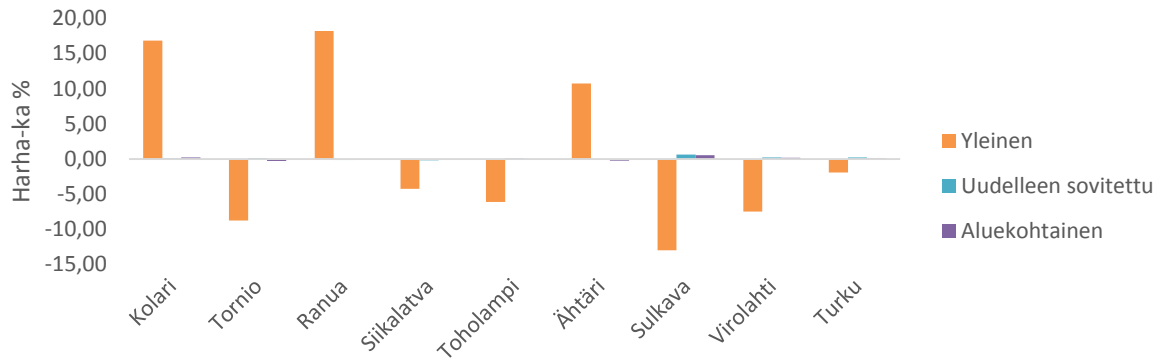
Taulukosta 12 ja kuvasta 10 voidaan havaita, että erityisesti Kolarin ja Ranuan inventointialueiden ennustetarkkuudet paranevat huomattavasti uudelleensovitettaessa yleinen tilavuusmalli pienellä, inventointialuetta hyvin edustavalla koealajoukolla. Kolarin alueella RMSE-keskiarvo pienenee 7,9 prosenttiyksikköä ja Ranuan alueella 7,6 prosenttiyksikköä. Muilla inventointialueilla RMSE-keskiarvot pienenevät 0,2 – 3,8 prosenttiyksikön välillä. Ainoan poikkeuksen muodostaa Siikalatvan inventointialue, jossa yleinen malli tuottaa uudelleensovitettua mallia 0,5 prosenttiyksikköä parempia ennusteita. RMSE-arvojen inventointialuekohtaiset keskihajonnat ovat yleisen ja uudelleensovitetun tilavuusmallin välillä lähes samaa suuruusluokkaa.

Tuloksista on myös huomattavissa, että pienellä koealajoukolla muodostetut aluekohtaiset tilavuusmallit tuottavat lähes kaikilla inventointialueilla hieman huonompia ennusteita kuin uudelleensovitettu yleinen malli. Uudelleensovitetun yleisen tilavuusmallin ja aluekohtaisten mallien inventointialuekohtaiset RMSE-keskiarvojen erot vaihtelevat 0,1 – 2,0 prosenttiyksikön välillä. Poikkeuksen tässä tapauksessa muodostaa Ranuan inventointialue, jonka aluekohtaisen mallin RMSE-keskiarvo on 0,7 prosenttiyksikköä pienempi kuin uudelleensovitetun yleisen tilavuusmallin. Aluekohtaisten mallien RMSE-arvojen keskihajonta on myös suurempaa kuin uudelleensovitetun yleisen tilavuusmallin. Korkein aluekohtaisten mallien RMSE-arvojen keskihajonta on Tornion inventointialueella.

Tämän lisäksi huomioitavaa on myös se, että suoraan käytetty yleinen tilavuusmalli tuottaa Siikalatvan, Toholammin, Virolahden ja Turun inventointialueilla keskimääräisesti hieman pienempiä RMSE-arvoja kuin pienellä koealajoukolla muodostetut aluekohtaiset mallit. Taulukosta 13 ja kuvasta 11 voidaan puolestaan havaita kuinka yleisen mallin inventointialuekohtainen harha lähenee hyvin lähelle nollaa uudelleensovitettaessa. Uudelleensovitetun yleisen tilavuusmallin harhakeskiarvo vaihtelee -0,2 ja 0,6 prosentin ja aluekohtaisten mallien -0,3 ja 0,5 prosentin välillä. Harhojen keskihajonta on molemmissa tapauksissa noin 2 – 3 prosentin luokkaa.



Kuva 10. Inventointialuekohtaisten tilavuusennusteiden suhteellisten RMSE-keskiarvojen erot käytettäessä suoraan yleistä mallia, pienellä koealajoukolla uudelleen sovittua yleistä mallia ja kyseessä olevalla koealajoukolla muodostettua aluekohtaista mallia eri inventointialueilla sadalla toistokierroksella.

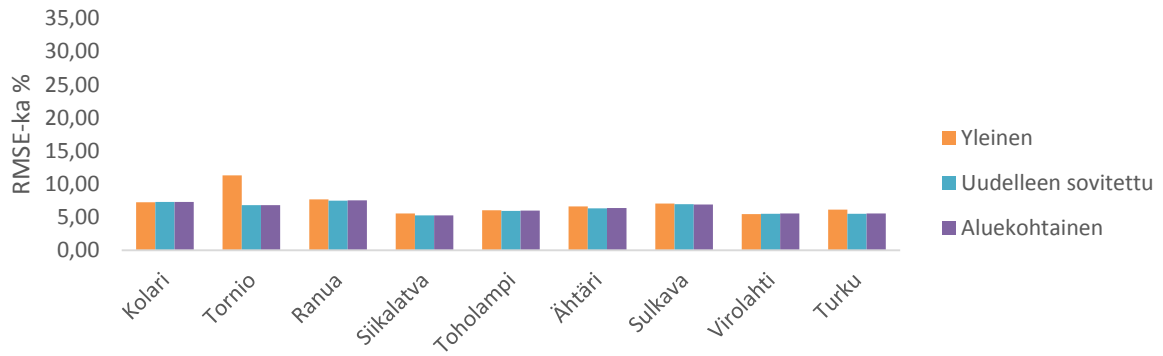


Kuva 11. Inventointialuekohtaisten tilavuusennusteiden suhteellisten harhakeskiarvojen erot käytettäessä suoraan yleistä mallia, pienellä koealajoukolla uudelleen sovitettua yleistä mallia ja kyseessä olevalla koealajoukolla muodostettua aluekohtaista mallia eri inventointialueilla sadalla toistokierroksella.

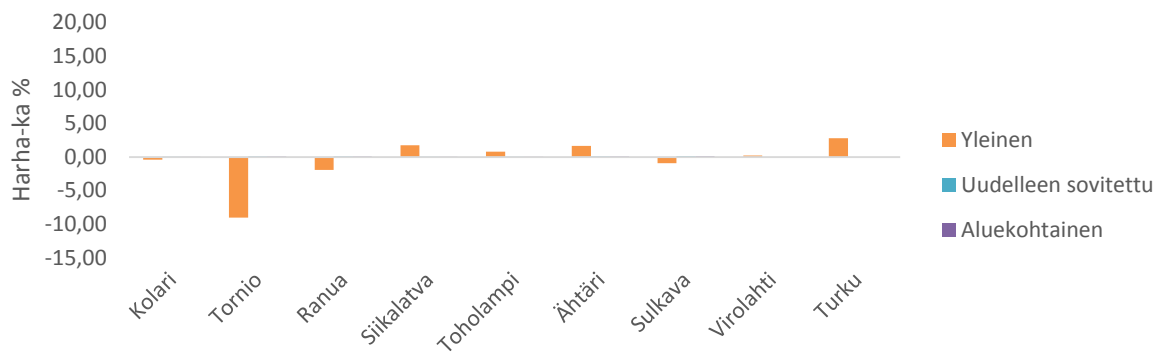
Taulukosta 14 ja kuvasta 12 voidaan havaita, että yleisen valtapituusmallin ja uudelleensovitetun yleisen tilavuusmallin väliset RMSE-keskiarvojen erot ovat hyvin pieniä. Suurimmat erot ovat Tornion ja Turun inventointialueilla. Tornion inventointialueella yleisen mallin ja uudelleensovitetun yleisen mallin välinen ero on 4,5 ja Turun inventointialueella 0,6 prosenttiyksikköä. Uudelleensovitetun yleisen mallin ja aluekohtaisten mallien RMSE-keskiarvojen erot ovat puolestaan vieläkin pienempiä, vain muutaman sadasosan luokkaa. RMSE-arvojen keskihajonnat eivät ole minkään mallin kohdalla kovinkaan suuria. Suurinkin RMSE-keskihajonta on vain 0,4 prosenttia.

Suurin hyöty yleisen valtapituusmallin uudelleensovituksessa on harhan pieneneminen lähelle nollaa kaikilla inventointialueilla. Suurimmat erot yleisen mallin ja uudelleensovitetun yleisen mallin välillä ovat tässäkin tapauksessa Tornion ja Turun inventointialueilla. Uudelleensovitetun yleisen valtapituusmallin ja aluekohtaisten valtapituusmallien suhteelliset harhakeskiarvot ja -keskihajonnat saavat suurimmalla osalla inventointialueista täysin samansuuruisia arvoja. Samankaltaiset RMSE- ja harhakeskiarvot sekä vastaavat keskihajonnat ovat aluekohtaisten ja uudelleensovitetun yleisen mallin välillä selitettävissä aluekohtaisten mallien muodolla. Aluekohtaisten mallien muodoksi valikoituu todennäköisesti suurimmalla osalla toistokierroksista sama selittäjä kuin yleisessä valtapituusmallissa.

Otoksen koealamääränä käytettiin 150 koealaa, koska tätä pienemmällä koealamäärällä joidenkin inventointialueiden aluekohtaiset mallit saattoivat tuottaa yksittäisellä toistokierroksella erittäin huonoja ennusteita, joka olisi vaikeuttanut tulosten vertailua. Huomioitavaa kuitenkin on, että uudelleensovitettu yleinen malli olisi toiminut erittäin hyvin myös pienemmällä koealajoukolla kaikilla toistokierroksilla. Esimerkiksi sadalla otoskoealalla päästäisiin jokaisella toistokierroksella erittäin hyviin tuloksiin.



Kuva 12. Inventointialuekohtaisten valtapituusennusteiden suhteellisten RMSE-keskiarvojen erot käytettäessä suoraan yleistä mallia, pienellä koealajoukolla uudelleen sovitettua yleistä mallia ja kyseessä olevalla koealajoukolla muodostettua aluekohtaista mallia eri inventointialueilla sadalla toistokierroksella.



Kuva 13. Inventointialuekohtaisten valtapituusennusteiden suhteellisten harhakeskiarvojen erot käytettäessä suoraan yleistä mallia, pienellä koealajoukolla uudelleen sovitettua yleistä mallia ja kyseessä olevalla koealajoukolla muodostettua aluekohtaista mallia eri inventointialueilla sadalla toistokierroksella.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Yleiset puuston laserkeilauspohjaiset kokonaistilavuusmallit luovat aluekohtaisiin malleihin verrattuna melko hyviä tuloksia, ottaen huomioon metsien hyvinkin erilaisen rakenteen Suomen pohjois- ja eteläosien välillä. Yleistä tilavuusmallia suoraan hyödynnettäessä on kuitenkin varauduttava mahdollisesti suuriinkin harhoihin varsinkin Suomen pohjoisosissa. Yleinen valtapituusmalli puolestaan toimisi tämän työn tulosten perusteella koko maassa erittäin hyvällä tarkkuudella.

Työn tulokset viittaavat siihen, että käytetyllä keilainyksilöllä ja mallilla voisi olla vaikutusta yleisen mallin ennustetarkkuuksiin. Näin ollen esimerkiksi Pohjois-Suomen yleisen tilavuusmallin ennustetarkkuuksia ja harhoja voitaisiin parantaa luomalla yleinen malli keilaintyypeittäin. Tämän lisäksi yleisen mallin lisäselittäjät tai mallin kalibrointi inventointialuekohtaisella kalibroitikertoimella voisivat olla myös vartenotettavia vaihtoehtoja yleisen mallin ennusteiden parantamiseen.

Yleisen mallin uudelleensovitus pienellä koealajoukolla parantaa erityisesti yleisen tilavuusmallin ennustetarkkuuksia ja pienentää inventointialuekohtaisia harhoja. Kyseessä olevalla koealajoukolla ei välttämättä pystytä muodostamaan aluekohtaista tilavuusmallia, jonka ennusteet olisivat parempia kuin uudelleensovitettun yleisen tilavuusmallin. Valtapituuden kohdalla uudelleensovituksella ei ole suurta hyötyä. Uudelleensovituksessa on pidettävä mielessä, että otoksen täytyy edustaa inventoitavaa aluetta mahdollisimman kattavasti. Tämän takia esimerkiksi aikaisemmasta alueen inventoinnista saatava tieto olisi erittäin tärkeää hyvän koealaotoksen suunnittelussa.

LÄHTEET

- Breidenbach, J., Glaser, C., Schmidt, M. 2008a. Estimation of diameter distributions by means of airborne laser scanner data. *Canadian journal of forest research* 38:1611–1620. 10 s.
- Breidenbach, J., Kublin E., McGaughey RJ., Andersen H-E., Reutebuch SE. 2008b. Mixedeffect models for estimating stand volume by means of small footprint airborne laser scanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 21 No. 1. 6 s.
- Fernandez Diaz, J. C. 2011. Lifting the Canopy Veil, Airborne LIDAR for archeology of forested areas, *Imaging Notes, Earth Remote Sensing for Security Energy and The Environment*, Vol. 26, No. 2. Saatavissa: http://www.imagingnotes.com/go/article_freeJ.php?mp_id=26 [Viitattu 20.04.2015] 4 s.
- Kangas, A., Päivinen, R., Holopainen, M. & Maltamo, M. 2011. *Silva Carelica* 40. Metsänmittaus ja kartoitus. Itä-Suomen yliopisto, Metsätieteiden osasto. 210 s.
2014. Kaukokartoitusperusteisen metsien inventoinnin koealojen maastotyöohje, versio 1.4. Suomen Metsäkeskus. 27 s.
- Korhonen L, Pippuri I, Packalen P, Heikkinen V, Maltamo M, Heikkilä J (2013) Detection of the need for seedling stand tending using high-resolution remote sensing data. *Silva Fenn* 47. Article 952. 20 s.
- Lappi, L. 1993. *Silva Carelica* 24. Metsäbiometrian menetelmiä, Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta. 182 s.
- Leppänen, V-J., Tokola, T., Maltamo, M., Mehtätalo, L. Pusa, T. and Mustonen, J. 2008. Automatic delineation of forest stands from lidar data. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. 38(4/C1). Proceedings of ISPRS workshop GEOBIA 2008, Calgary, Alberta, Canada. 6 s.
2012. Maastomittauksen työohje. Blom Kartta Oy. 4 s.
- Maltamo, M. and Packalen, P. 2014. Species-Specific management inventory in Finland. In: Maltamo., Næsset, E. and Vauhkonen, J. (eds.), *Forestry applications of airborne laser scanning -concepts and case studies. Managing Forest Ecosystems*. Springer. 12 s.
- Mehtatalo, L. and Lappi, J. N.d. *Forest Biometrics with Examples in R*. Textbook manuscript in preparation for Chapman & Hall. Käsikirjoitus. 156 s.
- Naeset, E. 2014. Area-Based Inventory in Norway – From Innovation to an Operational Reality. In: Maltamo., Næsset, E. and Vauhkonen, J. (eds.), *Forestry applications of airborne laser scanning -concepts and case studies. Managing Forest Ecosystems*. Springer. 26 s.
- Naeset, E., Bollandsås, OM., Gobakken, T. 2004. Comparing regression methods in estimation of biophysical properties of forest stands from two different inventories using laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 94. 13 s.
- Nummi, T., 2005. Sekamallit. Saatavissa: <http://www.sis.uta.fi/tilasto/sekamallit/moniste/SekamallitPDF.pdf> [Viitattu 08.05.2015] 110 s.
- Ratilainen, A. 2011. User guide, TTFIELD 2.0 etc. TerraTec Oy, Helsinki. 4 s.

Suvanto, A. and Maltamo, M. 2010. Using mixed estimation for combining airborne laser scanning data in two different forest areas. *Silva Fennica* 44(1): 91–107. 17 s.

Vauhkonen, J., Maltamo, M., McRoberts, R.E., and Næsset, E. 2014. Introduction to Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. In: Maltamo., Næsset, E. and Vauhkonen, J. (eds.), *Forestry applications of airborne laser scanning -concepts and case studies. Managing Forest Ecosystems*. Springer. 16 s.

2013. VMI-SMKI Maastotyöohje. 23 s.